

Cuaderno

Activa

•REVISTA CIENTÍFICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA•

Editorial

Desde la revista Cuaderno Activa buscamos presentar de forma periódica artículos científicos relevantes para la comunidad académica y científica, estos artículos son resultado de diferentes procesos investigativos los cuales se convertirán en nuevo conocimiento para nuestros lectores.

Para el número actual se han recolectado artículos de Ingeniería Ambiental, Ingeniería civil e Ingeniería de sistemas, los cuales abordan temas de interés para los diferentes investigadores, tenemos como punto de partida un análisis sobre el impacto de los residuos plásticos en el área del ROMPE, facilitando la comprensión de este tema y presentando algunas recomendaciones para afrontar esta problemática. Con un impacto similar, se analizan los diferentes contaminantes atmosféricos microbiológicos que pueden afectar la plaza de mercado de Tunja, donde se identifican algunos factores ambientales que promueven el crecimiento y propagación de microorganismos. Desde el impacto ambiental directo de la contaminación pasamos al aprovechamiento de residuos neumáticos, esto a través de la pirolisis para así disminuir el impacto de este tipo de contaminantes en el medio ambiente. Buscando tener diferentes temas de interés para nuestros lectores se presenta un análisis sobre la capacidad de la cal para mejorar la resistencia en mezclas para la mampostería, con lo que se logra identificar una mejoría marginal en la resistencia a compresión y compresión diagonal de la mampostería.

Haciendo uso de arboles de mínima expansión se busca dar solución al diseño de ciclo rutas en la ciudad de Bogotá de tal forma que se logren las rutas mas cortas. Además, se identifica un creciente interés en temas asociados a ciencia y analítica de datos como es el caso de aplicación de ciencia de datos en la enseñanza de técnica de elicitación de requisitos intentando identificar cual es la mejor técnica de enseñanza entre magistral y lúdica. Siguiendo la misma línea de investigación se presenta una revisión de literatura cuyo objetivo es la generación automática de ayudas en ejercicios de programación, sin embargo, se logra identificar en esta investigación que su aplicación aún no es viable de forma masiva. Dentro del campo de la ciencia de datos sus diferentes aplicaciones pueden abrumar a los interesados, por esta razón la presentación de investigaciones enfocadas en áreas específicas sirven como apoyo constante, este es el caso del análisis de datos de los hábitos transaccionales de los clientes de una entidad bancaria con el uso de la tarjeta debito, esto permite a las entidades bancarias analizar de forma detalladas el flujo de transaccional de los clientes que usan este tipo de producto. Finalmente se realiza una revisión de literatura de diferentes técnicas de aprendizaje automático con lo que se concluye que las técnicas actuales son evoluciones de técnicas anteriormente conocidas.

Esperamos que estos aportes realizados por diferentes investigadores sirvan de apoyo para diferentes investigaciones y avances en el conocimiento.

Gómez, Diana, García, Diego, Lache, Jaime, Cuéllar, Luz (2021). Análisis microbiológico de contaminantes atmosféricos en la plaza de mercado del sur de la ciudad de Tunja, Boyacá. Cuaderno Activa, 13, 25-40.



Análisis microbiológico de contaminantes atmosféricos en la plaza de mercado del sur de la ciudad de Tunja, Boyacá

Microbiological analysis of atmospheric pollutants in the south market square of the city of Tunja, Boyacá

Diana Catalina Gómez, Diego Felipe García, Jaime Ricardo Lache, Luz Ángela Cuéllar

Recibido: 15 noviembre 2020. **Aprobado:** 21 mayo 2021.

Resumen: Mediante el presente estudio se buscó hacer el análisis microbiológico de contaminantes atmosféricos en la plaza de mercado del sur de Tunja, por ser un lugar donde se desarrollan diferentes actividades económicas que facilitan la proliferación de diversas especies microbianas. Las condiciones microbiológicas del aire constituyen uno de los factores que requieren atención en las sociedades modernas, por el peligro que conllevan si no se encuentran en el estado adecuado. Por ello es necesario llevar a cabo estudios que permitan verificar estas condiciones, las cuales repercuten directamente en la salud humana y animal debido a que algunas sustancias microbiológicas son patógenas y actúan como vectores para la transmisión de enfermedades. Existen diferentes métodos para la recolección de bioaerosoles, uno de los más empleados es el método gravimétrico de sedimentación en placa, por la facilidad de

muestreo que brinda, y que fue aplicado en esta investigación durante un periodo de 6 semanas tomando muestras cada semana los días jueves a las 7:00 a. m. El análisis de las muestras se realizó en el laboratorio de microbiología de la Universidad Santo Tomás de la ciudad de Tunja. Se encontraron diversas especies bacterianas y fúngicas que representan un peligro para la salud humana y animal; además, a partir del asistente matemático MATLAB, se construyó la curva de crecimiento microbiano para cada sector estudiado comparando el modelo teórico con los valores experimentales, y se observó que existen diversas fluctuaciones entre estos debido a la incidencia de factores ambientales tales como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, que influyen directamente en el crecimiento de los microorganismos y en su posterior propagación.

1 Estudiante facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. diana.gomezc@usantoto.edu.co

2 Estudiante facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. diego.garciac@usantoto.edu.co

3 Estudiante facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. jaime.lache@usantoto.edu.co

4 Ph. D. en Ciencias Biológicas, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. luz.cuellar@usantoto.edu.co

Palabras clave: Bacteria; curva de crecimiento; patógenos; hongos; UFC.

Abstract: The microbiological conditions of the air constitute one of the prevailing factors in modern societies, due to the danger that these entail if they are not in the proper state, for this reason the need arises to carry out studies that allow to verify these conditions which have a direct impact on the human and animal health due to the fact that some microbiological substances are pathogenic and act as vectors for the transmission of diseases. The present project sought to carry out the microbiological analysis of atmospheric pollutants in the market square in the south of Tunja as this is one of the places where different economic activities take place which facilitate the proliferation of various microbial species. There are different methods for the collection of bioaerosols, one of the most used due to the ease of sampling it presents is the gravimetric method of plate sedimentation which was applied in this research in a period of 6 weeks, taking samples on Thursdays at 7:00 am. The analysis of the samples was carried out in the microbiology laboratory of the Santo Tomás University in the city of Tunja. Several bacterial and fungal species were found that represent a danger to human and animal health; moreover using the mathematical assistant MATLAB the microbial growth curve for each sector studied was constructed comparing the theoretical model with the experimental values, observing that there are various fluctuations between them due to the incidence of environmental factors such as temperature, relative humidity and wind speed that directly affect the growth of microorganisms and their subsequent spread.

Keywords: Bacteria; growth curve; health effects; fungi; CFU.

Introducción

Según Soto Varela et al. [1], la calidad del aire se define como la agrupación de compuestos que, en un momento de estudio, se encuentran en el aire y garantizan condiciones adecuadas para la salud de la población y el medioambiente, involucra aspectos claves tales como los factores químicos,

biológicos y microbiológicos. Estos últimos son de gran relevancia para determinar la calidad microbiológica del aire, por su incidencia directa en la salud humana y animal. A pesar de que el aire no cuenta con una microbiota propia, los microorganismos han desarrollado capacidades para sobrevivir en este medio y dispersarse a través de las corrientes de aire en diferentes entornos, como los cuerpos hídricos, las plantas, el suelo y la microflora humana [2]. Una de las formas como se pueden dispersar los microorganismos es a través de los conidios, los cuales son esporas fúngicas que cumplen un papel clave en la reproducción de estas especies cuando las condiciones ambientales son adversas, estas esporas les permiten alcanzar hábitats con mayor abundancia de alimento y colonizar esos lugares.

El desarrollo de actividades antrópicas ha favorecido la generación de residuos biológicos, físicos y químicos, los cuales emiten gran cantidad de partículas que facilitan la dispersión de los microorganismos en el aire. Además, al estar en constante exposición al medio ambiente, el ser humano es susceptible de contraer diferentes patologías a causa de una gran variedad de agentes microbiológicos [3]. Los mercados de abastos son uno de los lugares donde se presentan las condiciones ideales para la proliferación de microorganismos, debido a la presencia de diversas actividades económicas que generan problemas ambientales como la producción excesiva de residuos sólidos y su inadecuado manejo. La problemática en torno a la gestión inadecuada de estos residuos ha aumentado en los últimos años en países como Colombia, donde es escasa la formulación e implementación de sistemas de gestión de residuos que permitan construir una economía circular en la que los residuos sean vistos no como un desecho, sino como una materia prima con potencial de reutilización o reciclaje [4]. Estos factores favorecen que diversas especies microbianas entren en contacto con los alimentos, animales y personas que a diario concurren a estos mercados, lo cual constituye un grave problema de salud pública, puesto que pueden ocasionar desde síntomas gastrointestinales hasta enfermedades mortales [1].

Por otra parte, el interés de las personas por mantener una vida más saludable ha generado en los últimos años un aumento en el consumo de frutas y verduras [5], lo cual, a su vez, ha propiciado el incremento de enfermedades transmitidas por este tipo de alimentos, ya que se encuentran expuestos a la contaminación microbiológica presente en la atmósfera antes, durante y después de la cosecha. Un factor para considerar es la naturaleza de la flora contaminante, la cual puede variar ampliamente de acuerdo con el tipo de fruta o verdura analizadas, lo que incide directamente en la abundancia de las especies encontradas [5].

La plaza mayorista del sur de Tunja es uno de los principales puntos de abastecimiento de productos tales como frutas, verduras y carnes para la población tunjana, es un sitio donde estos sustratos orgánicos facilitan la reproducción y el crecimiento de bacterias, hongos y otros microorganismos, los cuales son potenciales causales de enfermedades respiratorias e infecciones cutáneas [2], por ello es fundamental identificar las especies microbianas presentes en esta plaza de mercado, con el objetivo de tomar medidas ante la proliferación de agentes patógenos que perjudiquen la salud de los visitantes.

Teniendo en cuenta lo anterior, en esta investigación se analizaron contaminantes atmosféricos de naturaleza microbiológica en el aire de la plaza de mercado del sur de la ciudad de Tunja, la cual constituye la principal central de abastos para la capital boyacense, con el fin de identificar los potenciales microorganismos causantes de enfermedades en el ser humano y en los animales.

Materiales y métodos

Área de estudio

Los muestreos se llevaron a cabo en la plaza de mercado del sur del municipio de Tunja, Boyacá, Colombia (05° 30' 30.96"N; 73° 22' 20.14" W), la cual tiene un área aproximada de 48.493,47 m².

Muestreo microbiológico

Se realizaron muestreos durante seis semanas, entre los meses de septiembre y octubre del año 2019 los días jueves a las 7:00 a. m., por ser el día y la hora en que más se presenta tránsito de

personas. En cada muestreo se registraron datos meteorológicos como la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, obtenidos a partir de la estación meteorológica UPTC (5° 33' 00" N; 73° 21' 36" W) ubicada a 5 km de la plaza de mercado. Se emplearon los datos de esta estación por ser la única presente en la zona de estudio, además, no contaba con datos faltantes para los días de muestreo. El procedimiento que se desarrolló para la toma de las muestras fue por medio del método denominado "impactación directa en medios de cultivo", en el cual, de acuerdo con [6], las partículas suspendidas en el aire tienden a precipitarse sobre las superficies. Este método consiste en dejar expuesta una caja de Petri con el medio de cultivo sólido seleccionado (Tryptone Glucose Yeast Agar), recorriendo las diferentes áreas, con el fin de captar estas partículas. Se realizó un recorrido de 15 minutos para cada una de las áreas (zona exterior, zona interior y zona de venta de animales). De igual forma, se tomó una cuarta muestra a lo largo de todo el recorrido con un medio de cultivo destinado al crecimiento de hongos (Medio de cultivo Potato Dextrose Agar).

Identificación de los microorganismos aislados

Las muestras recolectadas eran transportadas el mismo día que se tomaban al laboratorio de microbiología ambiental de la Universidad Santo Tomás, sede Tunja (05° 33' 2.07"N; 73° 20' 39.24" W), y se introducían las cajas de Petri boca abajo en la incubadora de referencia JSGL-50T a una temperatura de 37,4 °C por un periodo de 24 horas.

Luego de su crecimiento, se realizó el conteo de las unidades formadoras de colonias (UFC) mediante el método de conteo en placa empleando el equipo Boeco colony counter cc-1. Asimismo, se hizo la caracterización macroscópica de colonias y los procesos de fijación, tinción de Gram y acción enzimática para la identificación microscópica de cada uno de los géneros.

Es necesario mencionar que en la segunda visita se tomaron tres muestras, las cuales correspondieron a la zonas interior y exterior y la caja de Petri con el cultivo destinado para hongos, y en la cuarta visita se tomaron, de igual forma, tres muestras (zonas interior y exterior y zona de animales), ya que no se contaba con el cultivo para hongos en el laboratorio.

Modelo matemático

Mediante el modelo de crecimiento poblacional [7] (Ecuación 1), se comprobó la curva de crecimiento microbiano con los datos obtenidos mediante el método de conteo en placa.

$$dP/dt=K.P \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

dP/dt: Es la derivada de la población en función del tiempo

K: Constante de proporcionalidad

P: Población de colonias

Este modelo se desarrolla por el método de ecuaciones diferenciales mediante variables separables (Ecuación 2) y se obtiene:

$$P(t)=e^{Kt} \times C \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

P(t): Es la población en un tiempo determinado
e: Constante matemática de Euler que equivale aproximadamente a 2,71828

K: Constante de proporcionalidad

t: tiempo (en semanas) en que se desea conocer la población de microorganismos

C: Población inicial de microorganismos

Por medio de la ecuación 2 se determinaron las ecuaciones que describen la curva de crecimiento para cada una de las zonas estudiadas, junto con la muestra de hongos. Por último, a partir de las ecuaciones halladas anteriormente para las muestras estudiadas, se realizó el análisis comparativo entre el modelo teórico (MATLAB) y los valores hallados experimentalmente (ver Figuras 1, 2, 3 y 4).

Estudio cuantitativo (número de colonias)

El recuento de colonias que hayan crecido se expresa en unidades formadoras de colonias (UFC) referidas a 1 m³ de aire, las cuales se cuentan por triplicado y se promedian para dar un número de UFC de cada zona estudiada.

Para llevar a cabo el análisis estadístico, se elaboró una matriz de datos totales de las cuatro muestras. Se empleó el programa Stata versión 1, y se realizó un análisis de varianza de entrada múltiple a un nivel de significancia de (P = 0,05). Se asumió que los datos cumplían con los principios de normalidad y homocedasticidad [8]. La estadística descriptiva se presenta con el cálculo de la media estadística y la desviación estándar de los niveles de contaminación en UFC de las curvas teóricas frente a las curvas experimentales [9].

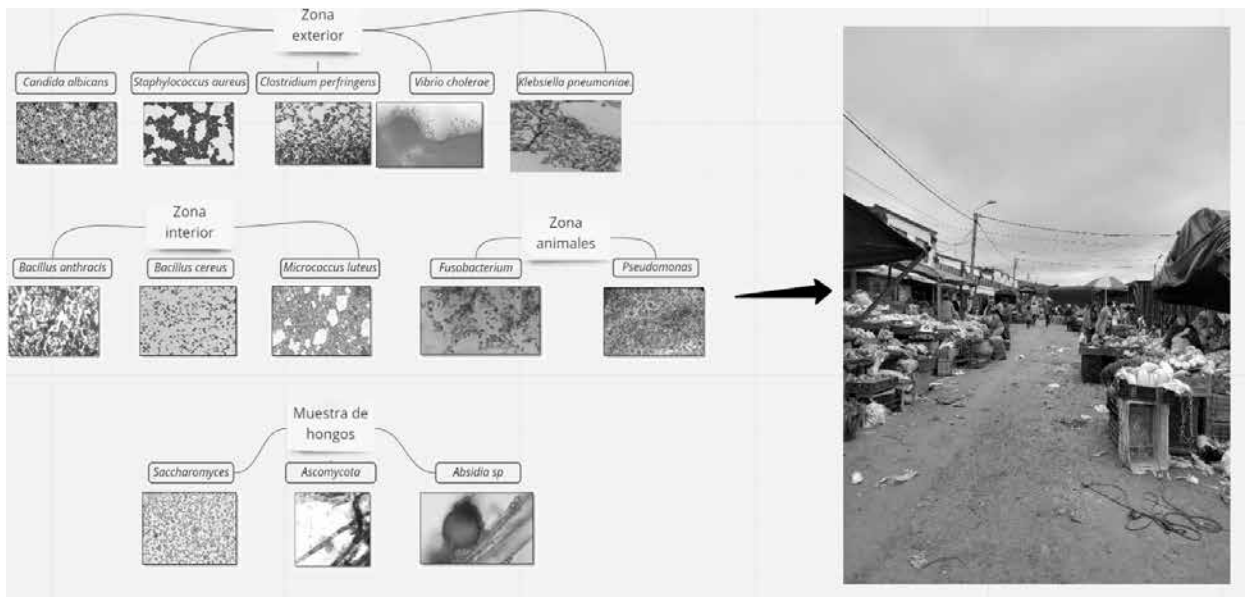


Figura 1. Resumen gráfico.

Resultados y Discusión

Condiciones ambientales y pronóstico del tiempo

Los datos meteorológicos registrados en los muestreos se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones ambientales registradas durante las seis semanas de muestreo en la plaza de mercado del sur de Tunja.

Condiciones ambientales	Muestreo					
	1	2	3	4	5	6
Temperatura (°C)	10	11	12	10	10	8
Humedad relativa (%)	86	88	93	90	95	98
Velocidad del viento (km/h)	6	8	3	5	5	4

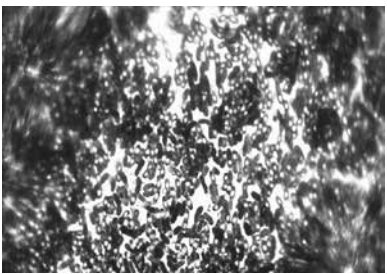
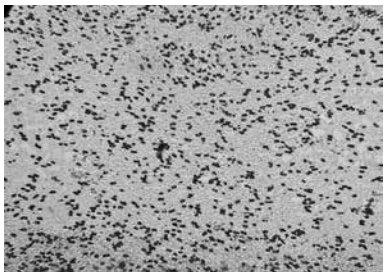
Fuente: Elaboración propia.

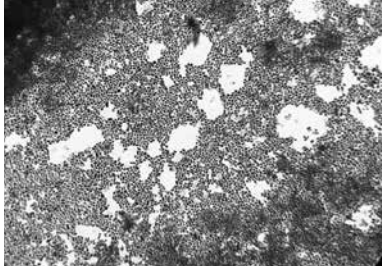
Los datos meteorológicos evidencian un ambiente con valores de temperatura bajos que oscilan entre 8 y 12 °C. La plaza de mercado se encuentra en una zona rural, lo cual contribuye a que se presenten velocidades del viento altas. Además, el sector presenta porcentajes de humedad mayores a 85 % en todos los muestreos (ver Tabla 1).

Descripción de los microorganismos observados

En las tablas siguientes (2, 3 y 4) se describen los microorganismos encontrados en la plaza de mercado del sur de Tunja. En la Tabla 2, los que se encontraron en la zona interior, en la Tabla 3, los que se hallaron en la zona exterior, y en la Tabla 4, los encontrados en la zona de animales. Finalmente, en la Tabla 5 se observan los microorganismos encontrados en las placas de Petri con el cultivo destinado para el crecimiento de hongos.

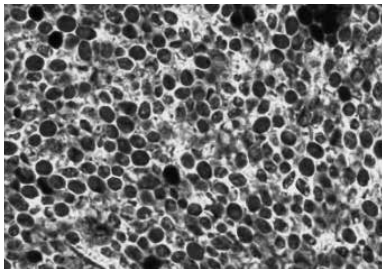
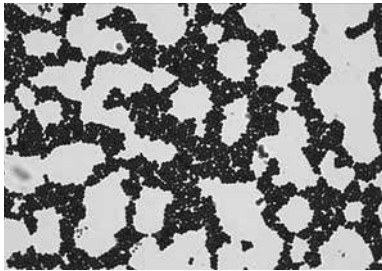
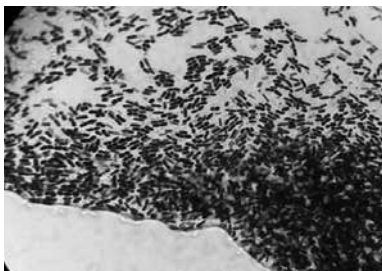
Tabla 2. Descripción de los microorganismos hallados en la zona interior de la plaza de mercado de la ciudad de Tunja.

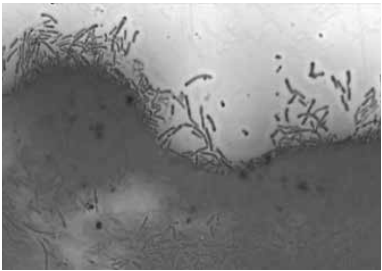
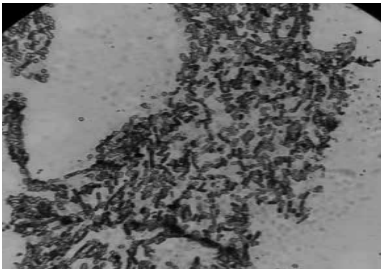
Zona interior	
Imagen observada	Observación
	Se constató la presencia de colonias de <i>Bacillus anthracis</i> , un bacilo Gram positivo de metabolismo tanto aerobio como anaerobio. Sus principales características son: su resistencia a las condiciones ambientales gracias a la formación de esporas y su cápsula constituida con ácido D-glutámico que le otorga sus propiedades virulentas. Provoca la enfermedad aguda del carbunco, o ántrax, que afecta a los mamíferos de pezuñas y a los seres humanos [10].
	Se encontró la presencia de <i>Bacillus cereus</i> , un bacilo Gram positivo que desarrolla esporas que le permiten adaptarse a diferentes condiciones ambientales de temperatura y radiación. Estos bacilos producen toxinas que son contaminantes de los alimentos, además son capaces de tolerar los procesos de cocción y pasteurización. Las enfermedades causadas por este microorganismo se transmiten principalmente por la ingesta de alimentos contaminados [11].

Zona interior	
Imagen observada	Observación
	Se observó la presencia de <i>Micrococcus luteus</i> en la zonas exterior e interior. Se trata de una especie de bacteria Gram positiva con una morfología esférica y un tamaño que oscila entre 0,5 a 3,5 μm . Es una bacteria aerobia obligada, que puede desarrollarse en diferentes ambientes, incluso forma parte de la microbiota de la dermis de los mamíferos. Entre las patologías más destacadas ocasionadas por <i>Micrococcus luteus</i> se encuentra la endocarditis, artritis séptica, meningitis e infecciones pulmonares como la neumonía [12].

Fuente: elaboración propia.


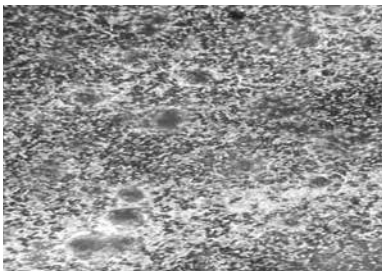
Tabla 3. Descripción de los microorganismos encontrados en la zona exterior de la plaza de mercado de la ciudad de Tunja.

Zona exterior	
Imagen	Observación
	Se halló evidencia de la presencia de <i>Candida albicans</i> . Son hongos unicelulares o levaduras que presentan blastoconidios subsféricos (3-8 x 2-7 μm); se encuentran con frecuencia en diferentes partes del cuerpo humano como un microorganismo comensal. Sin embargo, en pacientes con un sistema inmunológico débil este microorganismo puede ser un potencial causante de infecciones locales y sistémicas [13].
	También se encontró <i>Staphylococcus aureus</i> . Esta especie de bacteria Gram positiva presenta una morfología similar a un coco con tamaño de 0,5 a 1 μm de diámetro, y además se congrega en forma de racimos de uvas. Este microorganismo ocasiona gran variedad de patologías, como neumonía, fiebre alta, dolor de pecho, infecciones cutáneas, etc. [14].
	Se observó la presencia de <i>Clostridium perfringens</i> , una bacteria Gram positiva que presenta una morfología rectangular con extremos de forma redondeada o rectos. Produce esporas que sintetizan toxinas que pueden comprometer la salud humana y animal. Puede causar enfermedades como la septicemia y la gangrena e infecciones pulmonares. Además, provoca enteritis cuando su número en los alimentos es elevado [15] if not all, other CPE-producing strains.

Zona exterior	
Imagen	Observación
	<i>Vibrio cholerae</i> . Este bacilo presenta una morfología curva similar a una coma, con una longitud entre 2 y 4 micras [16]. Esta bacteria ocasiona la enfermedad del cólera cuando se ingieren alimentos o agua contaminados por ella [17]
	Se pudo evidenciar la presencia de <i>Klebsiella pneumoniae</i> , un bacilo Gram negativo de la familia <i>Enterobacteriaceae</i> , no tiene flagelos y es inmóvil, es característico de los humanos y bovinos, entre otros mamíferos. Este microorganismo es potencial causante de una gran variedad de infecciones nosocomiales [18].

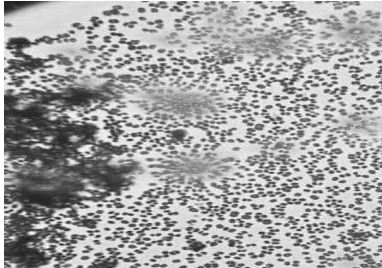
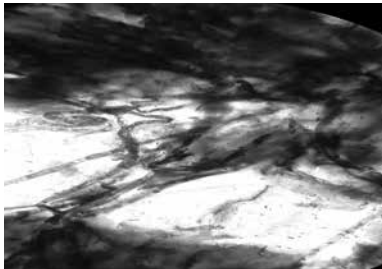

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Descripción de los microorganismos encontrados en la zona de animales de la plaza de mercado de la ciudad de Tunja.

Zona de animales	
Imagen	Observación
	En esta muestra se observó la presencia de <i>Fusobacterium</i> , un género de bacterias que se caracteriza por ocasionar diferentes patologías periodontales y cutáneas. Aunque generalmente son Gram positivas, también pueden adquirir la tinción negativa; presentan metabolismo anaerobio y un aspecto filamentosos. Algunas especies de <i>Fusobacterium</i> ocasionan necrobacilosis, una enfermedad causada por <i>Fusobacterium necrophorum</i> , la cual afecta a una gran variedad de animales, tanto domésticos como silvestres [19].
	Se encontró la presencia de <i>Pseudomonas</i> , unas bacterias en forma de bacilo en su mayoría gram negativas, que se desarrollan en ambientes donde la humedad relativa es alta (como es el caso de la zona de estudio). Pueden causar infecciones en diferentes órganos del cuerpo humano, como los pulmones, los oídos, los ojos, el corazón, etc. [20].

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Descripción de los microorganismos observados en la muestra de hongos.

Muestra hongos	
Imagen	Observación
	Tanto en la zona de animales como en la muestra de hongos, se observó la presencia de esporas del género <i>Saccharomyces</i> , el cual incluye distintos tipos de levaduras, que se caracterizan por ser fermentadores enérgicos de los azúcares bajo condiciones anaeróbicas [21].
	Se encontraron hongos de la división <i>Ascomycota</i> , que presentan la característica de poseer cuerpos fructíferos con un aspecto membranoso y emitir olores suaves. También hacen parte de este grupo la mayoría de los mohos que se encuentran en alimentos en descomposición y en la mayoría de las levaduras [22].
	Se observó, asimismo, la presencia del hongo filamentoso <i>Absidia sp</i> , que pertenece a la división <i>Zigomycota</i> . <i>Absidia</i> es un género de hongos de la familia <i>Mucoraceae</i> dentro del orden <i>Mucorales</i> . Es un zygomiceto considerado común en el medio ambiente. Es un microorganismo ubicuo, y por eso se dice que es un hongo contaminante en cultivos. Puede llegar a causar zygomicosis (mucormicosis) en personas inmunocomprometidas. Los conidios de <i>Absidia sp</i> pueden ser agentes de infecciones invasivas, en particular, provocan infecciones cutáneas y subcutáneas [22].

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos es importante mencionar, en primer lugar, que los microorganismos que se encuentran en el aire han creado adaptaciones que les han permitido desarrollarse en diferentes medios y así garantizar su supervivencia y permanencia. Estos organismos pueden causar enfermedades en plantas, animales y seres humanos, y a la vez causar alteraciones en los alimentos. Se identificaron diferentes microorganismos bacterianos y fúngicos causantes de enfermedades en el ser humano, el primero que se destaca es *Vibrio cholerae*, que se encontró

en la zona exterior de la plaza de mercado, el cual ocasiona la enfermedad del cólera que se caracteriza por producir cuadros severos de diarrea; de igual manera, se ha encontrado [1] que esta bacteria está asociada a la enfermedad de la gastroenteritis, que se adquiere por la ingesta de alimentos y agua contaminados por este microorganismo [17] O1 y O139, la capacidad de producción de toxina de estos serogrupos es un factor determinante en la virulencia. Características del agente El *Vibrio cholerae* es un bacilo Gram negativo, curvo, perteneciente a

la familia Vibrionaceae, móvil, flagelado, no forma esporas, mide de 2 a 5 micras de largo, sobrevive a temperaturas entre 22 ° C y 40 ° C y crece bien en medios alcalinos. Para el *Vibrio cholerae* O1 se han descrito 2 biotipos, El Clásico y El Tor, cada biotipo tiene tres serotipos: Inaba, Ogawa e Hikojima.. La infección se adquiere por la ingestión de alimentos o agua contaminada con el *Vibrio*, la dosis infectante es variable y depende del vehículo, requiriendo una menor dosis cuando el vehículo son corresponde a alimentos contaminados. El período de incubación es variable, depende de la dosis infectante fluctuando entre dos horas y cinco días. Patogenia La manifestaciones digestivas del cólera se producen por la capacidad que tiene el *V cholerae* O1 y O139 de secretar una enterotoxina responsable de promover la secreción de fluidos y electrolitos a nivel del intestino delgado. El *Vibrio cholerae* se adhiere a receptores celulares específicos presentes en la superficie de las células intestinales. Finalmente induce un bloqueo para la absorción de sodio y cloro por la vellosidad y promueve la secreción de cloro y agua por las células de las criptas intestinales. Cuadro Clínico El cólera es una enfermedad diarreica aguda, que afecta a individuos de todas las edades. Se caracteriza por la aparición de diarrea acuosa profusa con deshidratación secundaria de diferente cuantía. El 80% de los casos son asintomáticos o cursan con un cuadro leve. Un 20% se manifiesta con diarrea acuosa aguda profusa moderada y un 10-20% de estos puede evolucionar a un cuadro más grave. El inicio del cuadro es abrupto con diarrea líquida profusa descrita como "agua de arroz", asociada a náuseas, vómitos, dolor abdominal. Puede haber calambres musculares resultantes del desbalance hidroelectrolítico por la pérdida importante de potasio a través de las deposiciones. La fiebre se presenta en baja frecuencia (5%, y este aspecto aquí toma sentido, ya que esta bacteria se adhiere a la superficie de diversos alimentos tales como frutas y verduras, y si no se les realiza un lavado correcto este patógeno puede ingresar fácilmente al organismo y provocar sus efectos. En una investigación realizada en la plaza de mercado mayorista de la ciudad de Quevedo, Ecuador, también se detectó la presencia de *Vibrio cholerae* en la zona de mariscos [3].

En segundo lugar, se destaca la identificación de *Staphylococcus aureus* el cual se encontró dos veces

en la zona exterior. Esta especie de bacteria causa varias infecciones, tanto de origen comunitario como hospitalario, como neumonía e infecciones cutáneas, entre otras [14]. *Staphylococcus aureus* presenta una gran resistencia a las condiciones ambientales y está ampliamente distribuida en el aire, el agua y los residuos, por ende, se puede transmitir a una amplia gama de alimentos tanto de consumo directo como de origen animal, lo cual demuestra el potencial riesgo que tienen las personas que consumen alimentos de esta plaza de mercado si no se presentan adecuadas condiciones de higiene y preservación de estos productos, ya que existe una alta probabilidad de que la bacteria ingrese al cuerpo humano, porque presenta toxinas muy resistentes a los procesos de cocción [23]. Se debe mencionar que también se registraron *Staphylococcus* gram negativos en esta misma zona, este género de bacterias se destaca por su potencial patogénesis, ya que producen enterotoxinas que pueden causar diarreas, vómitos y náuseas [2].

También se identificó a *Micrococcus luteus*, tanto en la zona exterior como en la zona interior de la plaza de mercado, una bacteria potencial causante de enfermedades en el ser humano, está asociada a la endocarditis, artritis séptica, meningitis e infecciones pulmonares como la neumonía [12]. En otra investigación [2] *Micrococcus luteus* fue identificada en el aire de la plaza de mercado de la ciudad de Neiva, también se halló en el mercado mayorista de Quevedo [3].

En la zona exterior también se identificó a *Clostridium perfringens*, un patógeno que afecta no solo a los seres humanos, sino también al ganado. *C. perfringens* causa enfermedades histotóxicas y enfermedades que se originan en los intestinos, como enteritis o enterotoxemia (las toxinas producidas en el intestino se absorben en la circulación y luego dañan órganos como el cerebro). La virulencia de este anaerobio Gram-positivo, formador de esporas, es en gran parte atribuible a su capacidad de producir al menos 17 toxinas diferentes [15]. La enteritis, enfermedad provocada por esta bacteria, suele generarse cuando se encuentra en número elevado en alimentos, en especial verduras y productos cárnicos, los cuales son comercializados en la plaza de mercado del sur.

En la misma zona se encontró la presencia de *Klebsiella pneumoniae*, la cual representa un riesgo para la salud humana por su potencial patogénesis, pues puede provocar infecciones en gran parte del cuerpo humano [18]. En la investigación llevada a cabo en la plaza de mercado de Valencia y San Diego en Venezuela [5], se encontró *K. pneumoniae* en frutas tales como fresas, duraznos y guayabas, siendo estas frutas las posibles fuentes de identificación de esta bacteria. Finalmente, en la zona exterior se destaca la presencia de *Candida albicans*, especie fúngica que normalmente no ocasiona problemas de salud, pero que puede llegar a actuar como patógeno oportunista y provocar infecciones superficiales y sistémicas a pacientes inmunocomprometidos [13], y se encontraron, además, conidios fúngicos en esta misma zona probablemente pertenecientes a esta especie.

En cuanto a la zona interior, se encontró que predominan las especies de *Bacillus*, en particular, *Bacillus anthracis* y *Bacillus cereus*. El primero es conocido por provocar carbunco pulmonar o ántrax, una enfermedad infecciosa que afecta frecuentemente a los animales con pezuñas, por lo tanto, las personas que tengan un contacto directo con estos mamíferos pueden resultar contagiadas. El contagio por inhalación ocurre cuando las esporas de este microorganismo se introducen en el aparato respiratorio. La cercanía de la zona interior con la zona de animales puede ser la razón de encontrar esta bacteria en este sector. *Bacillus cereus*, por su parte, produce toxinas que contaminan los alimentos, las enfermedades causadas por este microorganismo en los humanos son principalmente transmitidas por el consumo de estos alimentos, ya que *B. cereus* es tolerante a los procesos de cocción o pasteurización [11]. Esta bacteria es la responsable de síndromes eméticos y diarreicos, además puede causar otras patologías como endocarditis y endoftalmítis [24].

En la zona de animales se destaca la presencia de colonias de *Pseudomonas*, bacterias capaces de producir infecciones en diferentes órganos del cuerpo humano [20]. Es de mencionar que en esta zona constantemente se encuentra personal de la plaza de mercado realizando obras de limpieza y adecuación, por lo cual son susceptibles de sufrir esta clase de infecciones. En segundo lugar, se

identificaron bacterias del género *Fusobacterium*, la *Fusobacterium necrophorum* ocasiona necrobacilosis o afecciones necrobacilares, que se refieren a padecimientos de los animales domésticos, en los cuales se presentan casos necróticos [19].

Por otro lado, durante los muestreos se aislaron distintas especies fúngicas, entre las cuales se encontraron esporas del género *Saccharomyces*, que incluye distintos tipos de levaduras. De acuerdo con [25] la producción es afectada por enfermedades fungosas, siendo la pudrición blanda de frutos una causa de pérdidas en precosecha y en poscosecha. La enfermedad es común; sin embargo, la información acerca de los agentes causales es escasa. El objetivo de este trabajo fue identificar a los hongos mucorales causantes de pudrición blanda mediante caracterización morfológica y molecular. Se recolectaron frutos enfermos durante el periodo mayo-octubre de 2014 en Colima, Veracruz y Oaxaca. Se aislaron hongos mucorales, se determinó la patogenicidad con los postulados de Koch y se registraron datos de estructuras fúngicas. La caracterización molecular se realizó mediante análisis de las regiones ITS1-5.8S-ITS2 y 28S (LSU, esta especie se encuentra con frecuencia y principalmente en la capa externa de las frutas. En el estudio realizado por [26] también se logró identificar *Saccharomyces* en la zona de carnes, pescado y comidas de la plaza de mercado de Tingo María en Perú.

En un muestreo se halló el género de hongos *Nannizziopsis*, que suelen crecer sobre cuernos y pezuñas. Asimismo, en dos ocasiones se constató la presencia de hongos de la división *Ascomycota*, su importancia radica en que son tipos de hongos que suelen crecer en alimentos en descomposición los cuales son muy comunes en este tipo de recintos [26]. Por último, se encontró la especie *Absidia sp*, la cual puede llegar a causar zygomicosis (mucormicosis) en personas inmunocomprometidas. Los conidios de *Absidia sp* pueden ser agentes de infecciones invasivas, en particular provocan infecciones cutáneas y subcutáneas, por lo que también representan un riesgo para la salud humana [22]. En México, se hallaron hongos mucorales en muestras de papaya, siendo esta una posible fuente de identificación para *Absidia sp* [25] la producción es afectada por

enfermedades fúngicas, siendo la pudrición blanda de frutos una causa de pérdidas en pre cosecha y en pos cosecha. La enfermedad es común; sin embargo, la información acerca de los agentes causales es escasa. El objetivo de este trabajo fue identificar a los hongos mucorales causantes de pudrición blanda mediante caracterización morfológica y molecular. Se recolectaron frutos enfermos durante el periodo mayo-octubre de 2014 en Colima, Veracruz y Oaxaca. Se aislaron hongos mucorales, se determinó la patogenicidad con los postulados de Koch y se registraron datos de estructuras fúngicas. La caracterización molecular se realizó mediante análisis de las regiones ITS1-5.8S-ITS2 y 28S (LSU). También se encontraron muestras de este tipo de hongos en una zona de comidas en la plaza de mercado estudiada por [26].

Los factores ambientales como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento influyen en la dispersión de esporas fúngicas. El aire es un medio óptimo para su dispersión, y a pesar de que son importantes para ciertas actividades agrícolas, pueden contribuir a afectar la salud humana. Según [27], se encuentran más esporas de hongos en las temporadas de verano y otoño posiblemente porque en las temporadas de altas precipitaciones la microbiota tiende a depositarse sobre la superficie terrestre, lo que retarda el proceso de dispersión. Sin embargo, en [2] se afirma que las esporas de hongos se dispersan más fácilmente cuando la humedad es alta con valores superiores al 70 %, lo cual concuerda con la humedad relativa que se presentó en las seis semanas de muestreo, la cual estuvo por encima del 80 %.

Considerando que los muestreos se desarrollaron en una zona en la cual la presencia de alimentos es alta y a la vez la movilidad de ganado es constante, hay que tener en cuenta que muchas de las plantas de las cuales se obtienen estos alimentos son el hábitat de diversos microorganismos patógenos, incluyendo las bacterias, lo que genera el aumento de partículas suspendidas en el aire por acción del viento y de la lluvia. Al mismo tiempo, los animales y seres humanos son una fuente de bacterias patógenas: en el caso de los humanos, al hablar, toser, estornudar y también el desprendimiento de cabello o heridas ocasionan presencia de bacterias, virus y hongos; y en el muestreo en la

zona de ganado, se identificaron microorganismos, ya que sus heces son potenciales generadores de patógenos que pueden ser suspendidos en la atmósfera [28].

Por otra parte, los factores ambientales, tales como la velocidad del viento, influyen en la dispersión de los microorganismos y de esporas bacterianas que se encontraron a lo largo de los muestreos. El viento es uno de los principales factores que permiten la dispersión de esporas al ambiente, a medida que aumenta la velocidad del viento mayor será el número de esporas que se desprenden, de hecho, cuando la velocidad es mayor a 1,8 km/h el potencial de dispersión aumenta de manera considerable, y la tendencia puede seguir hasta velocidades de 18 km/h. Esta información concuerda con los valores que se obtuvieron en las seis semanas de muestreo, ya que las velocidades del viento estuvieron por encima a 3,6 km/h (ver Tabla 1). La frecuencia repetitiva de la aparición de esporas bacterianas se debe a que estas formas de reproducción contribuyen a su supervivencia en diferentes condiciones ambientales, gracias a su desarrollo metabólico que no requiere el consumo de nutrientes para sobrevivir durante periodos prolongados. Además, su morfología y su baja densidad facilitan su dispersión en distintos medios [30]. Y aunque muchas de las esporas mueren en su recorrido por la atmósfera, la reproducción de unas pocas garantiza el desarrollo de la colonia [31].

Modelo matemático y datos experimentales

Las ecuaciones de crecimiento para cada zona estudiada obtenidas a partir de la ecuación 2, junto con la muestra de hongos, se ilustran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados teóricos obtenidos a partir de la ecuación de crecimiento poblacional.

Muestra	Ecuación de crecimiento	Población inicial (UFC)
Zona interior		147,249
Zona exterior		28,62168
Zona de animales		330,453
Hongos		164,934

En la zona interior se puede ver que el modelo teórico indica un crecimiento exponencial a lo largo del tiempo, sin embargo, se observan fluctuaciones con respecto a los valores tomados en campo, ya que las condiciones ambientales, como el viento, la humedad relativa y la temperatura, son diferentes de una semana a otra; de la semana uno a la dos y de la semana cuatro a la cinco se identifica una disminución en las UFC (Figura 2), y un factor que influye es el aumento de la humedad relativa, que puede ocasionar que ciertas especies bacterianas disminuyan su población.

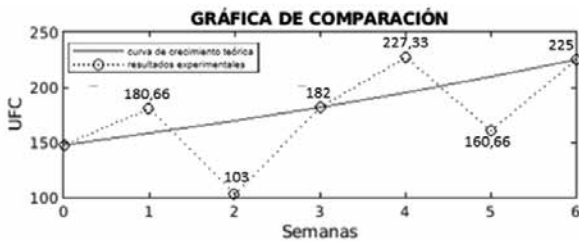


Figura 2. Comparación del modelo teórico de crecimiento con los valores experimentales para la zona interior.

Fuente: elaboración propia.

De igual manera, se observa un crecimiento exponencial a lo largo del tiempo en la zona exterior, ya que para la construcción de la ecuación de crecimiento se tomaron los valores de UFC de la semana 2 y de la semana 3, en los cuales se evidenció un aumento considerable en la población de especies bacterianas (Figura 3). No obstante, las fluctuaciones son evidentes, con aumentos y disminuciones en las seis semanas de muestreo. Además, se observa una disminución de las UFC de la semana 5 a la 6, ya que tanto la velocidad del viento como la temperatura disminuyeron, un km/h y 2 °C, respectivamente, mientras que la humedad relativa aumentó, lo cual influye en la dinámica poblacional de las especies bacterianas que suelen reproducirse de mejor manera cuando aumenta la velocidad del viento y la temperatura [29].



Figura 3. Comparación del modelo teórico de crecimiento con los valores experimentales para la zona exterior.

Fuente: elaboración propia.

En la zona de animales se observó un comportamiento diferente a las dos zonas previamente mencionadas, puesto que tanto la ecuación de crecimiento poblacional como los valores experimentales muestran una tendencia a la baja en la cantidad de UFC, solo con una excepción en el cambio de la población de la semana 1 a la 3, donde se presentó un incremento (Figura 3). El decrecimiento bacteriano en esta zona de estudio se puede deber a que el tránsito de animales fue muy limitado en el periodo de estudio, además se observó que con el paso de las semanas esta zona presentaba una mejor calidad higiénica ya que existía la presencia de personal encargado del aseo de esta zona. Por otro lado, la disminución en la temperatura y el aumento en la humedad relativa desde la semana 3 a la semana 6 puede ser causante de la disminución de las UFC en esta zona, lo cual concuerda con lo establecido en la investigación realizada por [2].

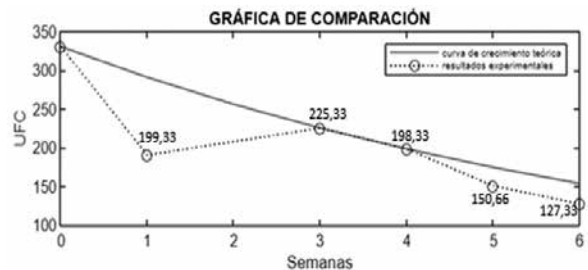


Figura 3. Comparación del modelo teórico de crecimiento con los valores experimentales para la zona de animales.

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la muestra de especies fúngicas, de acuerdo con el modelo teórico se observa un crecimiento exponencial, comportamiento que también se evidenció en la práctica, aunque las UFC disminuyeron en el periodo que comprende de la semana 3 a la semana 5 (Figura 4), debido al cambio de los factores ambientales, en especial de variables como la temperatura, la cual se redujo en 2 °C durante estas dos semanas, y la humedad relativa, la cual aumentó en un 2 %. Esto concuerda con lo hallado en [2]a, donde se identificó que las UFC de hongos encontradas en el aire de Neiva eran mayores cuando aumentaba la temperatura y disminuía la humedad relativa.



Figura 4. Comparación del modelo teórico de crecimiento con los valores experimentales para la muestra de hongos.

Fuente: elaboración propia.

Se identifica que el lugar que más presentó UFC fue la zona de animales con 180,196, en contraste, la que menos presentó fue la zona exterior con 165,105, sin embargo, la mayor diversidad de microorganismos estuvo en la zona exterior con un total de siete especies diferentes en comparación con los dos géneros presentes en la zona de animales. Probablemente esto se deba a que la zona exterior junto con la zona interior, que presentó 179,775 UFC en promedio, son las zonas por donde más transitan las personas y donde se ubican los alimentos, de ahí la diversidad de microorganismos encontrados en estas dos zonas. De igual manera, la mayoría de las especies bacterianas encontradas fueron gram positivas, cuya pared celular es más gruesa, lo que les proporciona una mayor resistencia a las diferentes condiciones ambientales.

Al realizar una comparación con estudios llevados a cabo en plazas de mercado en Ecuador [3] y Perú [26], se observa que la cantidad de UFC encontradas en la presente investigación fue significativamente más baja, esto puede obedecer a que el área de dichos mercados es mayor, lo que hace que tanto el tránsito de personas como la cantidad de alimentos y productos expuestos a la contaminación aumenten. Además, las condiciones climáticas son diferentes: en [26] la temperatura ambiental registrada en los muestreos realizados es superior a los 25 °C, por lo tanto, de acuerdo a lo mencionado por [2], la cantidad de especies bacterianas y fúngicas se dispersan más fácilmente.

Comparada con investigaciones similares, la cantidad de UFC en la plaza de mercado del sur de Tunja fue más baja, sin embargo, la diversidad de especies bacterianas y fúngicas identificadas (13 especies) fue mayor que en la plaza mayorista 25 de julio en Quevedo, Ecuador (9 especies) [3]. Pero al comparar con la investigación realizada por [26] el resultado fue similar, ya que en el mercado Modelo de Tingo María se encontraron 15 especies diferentes de bacterias y hongos.

Conclusiones

El análisis microbiológico de contaminantes atmosféricos en la plaza de mercado del sur de Tunja permitió obtener un diagnóstico de la situación actual de la microbiota presente en el aire de este recinto, con el cual se concluye que el riesgo de infección es de medio a alto por la cantidad significativa de especies bacterianas y fúngicas encontradas, con capacidad de generar graves patologías en el ser humano (afectaciones pulmonares, infecciones cutáneas, enfermedades gastrointestinales), y en los animales, como es el caso de la bacteria *Fusobacterium*, que provoca casos necróticos, así como *Bacillus anthracis*, que afecta el ganado pero que es transmitida a los seres humanos y provocar el carbunco pulmonar, una enfermedad que puede ser mortal si las esporas logran germinar en el interior del organismo.

Por otra parte, se observó que los factores ambientales, como temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, influyen de manera directa tanto en el crecimiento de los microorganismos

como en su propagación: humedades altas y velocidades del viento mayores a 1 m/s son condiciones que favorecen el asentamiento de las especies bacterianas y fúngicas en la plaza de mercado del sur de Tunja. Por esta razón, existen discrepancias entre el modelo de crecimiento teórico, determinado por las ecuaciones diferenciales, que no tiene en cuenta la intervención de las condiciones ambientales, y el modelo de crecimiento que considera los valores experimentales que están determinados por la intervención de estas condiciones. Se observó que la disminución en la cantidad de UFC se debe a la temperatura y la humedad relativa; en general, una temperatura más baja y una humedad más alta generan una reducción en las comunidades bacterianas y fúngicas.

No se encontraron registros de los brotes de contagio provocados por los microorganismos encontrados en la plaza de mercado y tampoco de las enfermedades transmitidas por los alimentos comercializados en este lugar, lo que puede obedecer a que en países subdesarrollados como Colombia esta clase de brotes epidémicos no suelen denunciarse y no se reportan suficientes investigaciones al respecto [5]. Sin embargo, es necesario realizar acciones encaminadas a mejorar las condiciones de salubridad al interior de la plaza de mercado, para lo cual se debe establecer un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos con miras a reducir los impactos ambientales negativos derivados de la disposición inadecuada de los residuos generados, y de esta forma disminuir la probabilidad de contraer alguna de las patologías provocadas por los microorganismos contaminantes.

Con la realización de esta investigación se recomienda que los lugares de trabajo, y en este caso zonas de amplia influencia, tengan áreas ventiladas, ya que estas características permiten disminuir concentraciones altas de microorganismos perjudiciales para la salud de las personas, tanto quienes concurren a esta plaza de mercado como los vendedores que pasan mayor tiempo en ella. La desinfección debería estar a cargo de una empresa capacitada para tal labor, dado que la limpieza que actualmente recibe la

plaza de mercado es de las personas que tienen allí su puesto de venta, y su área de influencia es exclusivamente los alrededores de dicho puesto.

Referencias

- [1] Z. S. Varela, L. P. Lavalley y D. E. Alvarado, "Bacteria causing of foodborne diseases: An overview at Colombia," *Salud Uninorte*, vol. 32, n.º 1. Universidad del Norte, pp. 105-122, Jan-2016. doi: 10.14482/sun.32.1.8598.
- [2] C.A. Méndez-Puentes, J. G. Camacho-Suárez y S. Echeverry-Hernández, "Identificación de bacterias y hongos en el aire de Neiva, Colombia," *Rev. Salud Pública*, vol. 17, n.º 5, pp. 728-737, 2015. doi: 10.15446/rsap.v17n5.3846
- [3] V. H. Campoverde y A. D. Vélez, "Identificación de contaminantes biológicos en el mercado mayorista 25 de Julio de la ciudad de Quevedo y su relación con riesgos laborales y enfermedades profesionales", *SciELO.Sld.Cu*, n.º 1715958359, p. 2751430, 2015.
- [4] Y. L. Pulgarín y B. F. Orozco, "Gestión de residuos sólidos urbanos: Un enfoque en Colombia y el departamento de Antioquia", *Cuad. Act.*, n.º 12, 2020.
- [5] A. Gil, A. M. de Salim y Y. Gaesrte, "Calidad microbiológica en frutas de conchas comestibles expandidas en mercados populares de los municipios Valencia y San Diego, estado Carabobo, Venezuela", *Rev. la Soc. Venez. Microbiol.*, vol. 33, n.º 2, pp. 105-109, 2013.
- [6] L. M. G. Fierro y J. A. P. Bernal, "Protocolo de monitoreo y análisis de calidad microbiológica del aire en centros de atención médica", Universidad Santo Tomás, Tunja, 2016.
- [7] D. G. Zill y W. S. Wright, *Ecuaciones Diferenciales con problemas con valores en la frontera*, 8.ª ed., México: Cengage Learning Eds., 2013.

- [8] P. Acosta, B. Pacheco, L. Á. Cuéllar y M. Díaz Pita, "Análisis de variables físicas y microbiológicas en el proceso de compostaje de biosólidos en pilas menores a un metro cúbico", *Cuaderno Activa*, n.º 11, pp. 23-32, 2019.
- [9] G. E. Meek, W. Mendenhall, R. L. Scheaffer, y D. D. Wackerly, "Estadística matemática con aplicaciones", *Technometrics*, vol. 29, n.º 3, p. 384, 1994.
- [10] J. L. Cañada y J. R. García, "Carbunco", vol. 29, n.º 5, pp. 7-10, 2003.
- [11] J. Sánchez, M. Correa y L. M. Castañeda-Sandoval, "Bacillus cereus un patógeno importante en el control microbiológico de los alimentos", *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, vol. 34, n.º 2, 2016. doi: 10.17533/udea.rfnsp.v34n2a12
- [12] L. Souhami, R. Feld, P. G. Tuffnell y T. Feller, "Micrococcus luteus pneumonia: A case report and review of the literature", *Med. Pediatr. Oncol.*, vol. 7, n.º 4, pp. 309-314, 1979. doi: 10.1002/mpo.2950070404.
- [13] M. L. Espina Suárez, G. J. Guillen Rivera, B. Calvo y L. M. Meza, "Caracterización morfológica y fisiológica de las especies candida aisladas de la cavidad bucal de pacientes geriátricos", *Cienc. Odontológica*, vol. 2, n.º 2, pp. 110-119, 2005.
- [14] J. J. Camarena y R. Sánchez, "Infección por Staphylococcus aureus resistente a meticilina", Departamento de Microbiología, Hospital Universitario Doctor Peset, Valencia, 2008.
- [15] J. C. Freedman, A. Shrestha y B. A. McClane, "Clostridium perfringens enterotoxin: Action, genetics, and translational applications," *Toxins (Basel)*, vol. 8, n.º 3, 2016. doi: 10.3390/toxins8030073
- [16] R. J. Borroto, "Ecology of vibrio cholerae serogroup 01 in aquatic environments," *Rev. Panam. Salud Pública/Pan Am. J. Public Heal.*, vol. 2, n.º 5, pp. 328-333, 1997. doi: 10.1590/S1020-49891997001100005
- [17] Ministerio de Salud Pública de Colombia, "Cólera. Diagnóstico, tratamiento y prevención", 2013. Disponible en: <https://www.minsal.cl/portal/url/item/951d40f3a5b-b42a2e04001011e013c17.pdf>
- [18] L. M. E. Toro, S. L. A. Muñoz, y J. R. Restrepo, "K. pneumoniae y betalactamasas. Un problema creciente", *Med. UPB*, vol. 28, n.º 2, pp. 135-141, 2009.
- [19] K. Arane y R. D. Goldman, "Les infections à Fusobacterium chez l'enfant", *Can. Fam. Physician*, vol. 62, n.º 10, pp. 4-8, 2016.
- [20] C. A. Romero Bohórquez, D. F. Castañeda y G. S. Acosta, "Determinación de bacterias en el aire del laboratorio de microbiología de la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas asociadas a posibles afecciones en la salud", Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2015.
- [21] C. Calizaya Limaco, G. Salazar Torres y J. Silva Aburto, "Evaluación de hongos ambientales en mercados de abastos de la ciudad de Tacna - Perú", *Revista Mexicana de Micología*, vol. 31, pp. 65-67, 2010.
- [22] F. Pacasa-Quisbert, M. G. Loza-Murguía, A. Bonifacio-Flores, L. Vino-Nina y T. Serrano-Canaviri, "Comunidad de hongos filamentosos en suelos del Agroecosistema de K'iphak'iphani, Comunidad Choquenaira-Viacha", *J. Selva Andin. Res. Soc.*, vol. 8, n.º 1, pp. 2-25, 2017. doi: 10.36610/j.jsars.2017.080100002

- [23] Fundación Vasca para la seguridad agroalimentaria, "Staphylococcus aureus", 2013. Disponible en: http://www.elika.net/datos/pdfs_agrupados/Documento95/7.Staphylococcus.pdf
- [24] I. Portuondo, "Bacillus cereus y su papel en las intoxicaciones alimentarias", *Rev. Cuba. Salud Pública*, vol. 38, n.º 1, pp. 98-108, 2012.
- [25] I. Cruz-Lachica, I. Márquez-Zequera, R. S. García-Estrada, J. A. Carrillo-Fasio, J. León-Félix y R. Allende-Molar, "Identificación de hongos mucorales causantes de la pudrición blanda en frutos de papaya (*Carica papaya* L.) en México", *Rev. Mex. Fitopatol. Mex. J. Phytopathol.*, vol. 35, n.º 3, pp. 397-417, 2017. doi: 10.18781/r.mex.fit.1611-3
- [26] D. C. Torres Cárdenas, "Microorganismos del aire interno de seis sectores del mercado Modelo de Tingo María", Informe de práctica pre-profesional, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Perú, 2011. Disponible en: https://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/MICROORGANISMOS%20DEL%20AIRE%20INTERNO%20DE%20SEIS%20SECTORES%20DEL%20MERCADO%20MODELO%20DE%20TINGO%20MARIA.pdf
- [27] R. Ramos y V. Meza, "Efectos de algunos factores meteorológicos sobre la concentración de esporas de hongos en la Plaza San Martín de Lima, Perú", *Ecol. Apl.*, vol. 16, n.º 2, 2017.
- [28] A. Cruz y A. Jiménez, "Evaluación de la contaminación del aire por microorganismos oportunistas y su relación con material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) en la localidad de Puente Aranda", tesis de grado, Universidad de La Salle, Bogotá, 2006.
- [29] K. V. Mallaiah y A. S. Rao, "Aerial dissemination of urediniospores of groundnut rust", *Trans. Br. Mycol. Soc.*, vol. 78, n.º 1, pp. 21-28, 1982. doi: 10.1016/s0007-1536(82)80072-7
- [30] Á. P. Álvarez Rodríguez y G. H. Meza Ruiz, "Correlación de microorganismos patógenos existentes en los ambientes intra y extramural presentes en jardines infantiles más y menos influenciados por factores contaminantes ubicados en las localidades de Fontibón y Kennedy", tesis de grado, Universidad de La Salle, Bogotá, 2009.
- [31] M. Mosso, C. Ullán y M. Rosa, "El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos", *Observatorio Medioambiental*, n.º 5, pp. 375-402, 2002. Disponible en: <https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/view/OBMD0202110375A>

Zacaria, Amelia, Sánchez, Sulpicio (2021). Cal como factor influyente en la resistencia a compresión diagonal de la mampostería. Una revisión. Cuaderno Activa, 13, 61-72.



Cal como factor influyente en la resistencia a compresión diagonal de la mampostería

Alma Delia Zacaria Vital¹, Sulpicio Sánchez Tizapa¹

Recibido: 13 julio 2021. Aprobado: 28 septiembre 2021.

Resumen: En este artículo se analiza el uso de la cal en la mezcla del mortero de pega y su influencia en la resistencia a compresión diagonal de la mampostería elaborada con piezas ligeras de concreto. Se desarrollaron pruebas en el agregado fino, en mortero fresco y seco, así como en especímenes de mampostería, de acuerdo con la norma mexicana. Se emplearon dos dosificaciones con diferentes cantidades de cal: en la primera (D2) se usó 25 % del peso del cemento en cal y en la segunda (D4), 8 %. El agregado cumple con los requerimientos normativos, al tiempo que se cumplen tres de cuatro propiedades del concreto fresco. La resistencia a compresión de diseño de la dosificación D2 aumentó 7 % con respecto a la registrada en la dosificación D4. En el mismo orden, la resistencia de diseño a compresión diagonal fue de 5,53 kg/cm² y 5,24 kg/cm², ambos son mayores al valor normativo de 2 kg/cm². La resistencia de diseño a compresión no alcanzó el límite inferior normativo igual a 20 kg/cm². Finalmente, se concluye que la cal mejoró marginalmente la

resistencia a compresión y compresión diagonal de la mampostería.

Palabras clave: mortero, compresión diagonal, murete, pila, cal, mezcla.

Abstract. This paper analyzes the use of lime in the mortar mixture and its influence on the diagonal compressive strength of the lightweight concrete masonry. Tests on fine aggregate, on fresh and dry mortar, as well as on masonry specimens were developed according to the Mexican standard. Two dosages with different amounts of lime were used, in the first one (D2) 25% of the weight of cement was placed in lime and in the second one (D4) 8% was used. The fine aggregate meets the local standard as well as three of four properties of the fresh concrete. The design compressive strength of the mixture D2 increased 7% over that of the mixture D4; however, the first did not reach the standardized parameter of 20 kg/cm². In the same order, the design diagonal compressive

1 Alma Delia Zacaria Vital. Arquitecta Urbanista. Universidad Autónoma de Guerrero. México, Chilpancingo Guerrero.

Correo electrónico: deliazacaria93@gmail.com ORCID:

2 Sulpicio Sánchez Tizapa. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Guerrero, Chilpancingo, México.

Correo electrónico: sstizapa@uagro.mx

strength was 5.53 kg/cm² and 5.24 kg/cm², both are higher than the normative value of 2 kg/cm². Finally, it is concluded that lime marginally improved the compressive and diagonal compressive strength of the masonry elaborated by lightweight concrete pieces.

Keywords: mortar, diagonal compression, walls, piles, lime, mix.

Introducción

El estado de Guerrero registra alrededor del 25 % de la sismicidad de la república mexicana, lo cual se debe a la subducción de la Placa de Cocos (placa oceánica) por debajo de la Placa Norteamericana (placa continental). El punto de encuentro ocurre frente a las costas del Pacífico, desde Jalisco hasta Chiapas.

Algunos sismos importantes ocurridos en Guerrero son el sismo del Ángel del 28 de julio de 1957 de magnitud 7,5 y el sismo de Petatlán, del 14 de marzo de 1979, con magnitud de 7,6. Ambos generaron daños importantes en regiones cercanas al epicentro y en la Ciudad de México.

Recientemente, a causa del sismo del día 10 de diciembre del 2011, en la comunidad de Apaxtla de Castrejón Gro., situada a 20 km del epicentro, se detectaron daños severos en 5 viviendas de mampostería y 63 viviendas de adobe. De las últimas, 35 % presentaron agrietamiento en esquinas debido al amarre deficiente entre los muros, con grietas desde el techo hasta la cimentación. Además, 24 % presentaron grietas en esquinas de aberturas y el 9 %, grietas verticales en el centro de los muros [1]. Se observó que los colapsos en las viviendas ocurren por la debilidad en las estructuras, porque son construidas sin criterio ingenieril y por autoconstrucción, razón por la cual no cuentan con los elementos estructurales mínimos para resistir las fuerzas que genera un sismo.

La mampostería no confinada es más vulnerable que la mampostería confinada, como lo muestran los mayores daños durante el sismo de 2017 [2].

Aunado al riesgo sísmico, la norma actual de mampostería considera un valor máximo de 2 kg/cm² para la resistencia de diseño a compresión diagonal, que es insuficiente para resistir las fuerzas cortantes inducidas [5]. Por lo tanto, para disminuir la vulnerabilidad, es imperativo el uso de materiales más resistentes con morteros adecuados que mejoren la resistencia de la mampostería.

El objetivo de esta investigación es evaluar la resistencia a compresión diagonal de la mampostería elaborada con piezas de concreto y junteadas con mortero cemento-cal, con la idea de modificar favorablemente dicha propiedad.

Estado del arte

Mortero

El mortero para pegar piezas debe cumplir con los requisitos establecidos en la norma mexicana [3]. Dicha norma establece las especificaciones y métodos de ensaye que debe cumplir el mortero elaborado con cemento hidráulico, cemento de albañilería y/o cal hidratada, para la construcción de elementos de mampostería de uso estructural.

Resistencia a compresión del mortero

La resistencia a compresión del mortero, sea para pegar piezas o para relleno, se determina de acuerdo con el ensaye especificado en la norma mexicana [4]. Los especímenes son cubos (50 mm x 50 mm) y cilindros (10 x 20). Para diseño se empleará el valor registrado en el 98 % de las muestras. Se debe ensayar un lote de al menos nueve probetas, como también cumplir las especificaciones de elaboración y curado.

Clasificación del mortero

Los morteros se clasifican por su resistencia de diseño a compresión en los siguientes tipos [5]:

- Tipo I: con resistencia a compresión mayor o igual que 12,5 MPa (125 kg/cm²).
- Tipo II: con resistencia a compresión menor que la del Tipo I y mayor o igual que 7,5 MPa (75 kg/cm²).

Para el control en campo se utilizará la resistencia media de acuerdo con lo indicado en [3].

Mortero para pegar piezas

Los morteros empleados en elementos estructurales de mampostería presentan las siguientes características [5]:

- La resistencia a compresión será por lo menos de 7,5 MPa (75 kg/cm²).
- Deben contener cemento hidráulico Portland en la cantidad mínima indicada en la Tabla 1.
- El volumen de arena no será mayor que tres veces la suma de los cementantes y se medirá en estado suelto.
- La cantidad de agua será la mínima que dé como resultado un mortero fácilmente trabajable.
- Cuando el mortero incluye cemento de albañilería, la cantidad máxima de éste que se debe usar en combinación con cemento será la indicada en la Tabla 1.

Tabla 1. Proporciones, en volumen, recomendadas para mortero dosificado en obra*.

Tipo de mortero	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal hidratada	Partes de arena**
I	1	—	0 a ¼	3
	1	½	---	4½
II	1	1	0 a ½	4½
	1	—	----	6

* Las proporciones incluidas en esta tabla son sólo indicativas, por lo que el mortero deberá cumplir con la resistencia a compresión de diseño establecida en el inciso 0, independientemente de la dosificación que se utilice.

** El volumen de arena se medirá en estado suelto.

Fuente: [5].

Antecedentes experimentales

A continuación, se exponen los resultados de trabajos realizados sobre las propiedades de la mampostería con bloques de concreto, con la idea de aumentar la resistencia a compresión diagonal de la mampostería, el valor reportado corresponde al promedio y/o de diseño.

Morante [6] utilizó tres técnicas de construcción distintas:

- Técnica A (Patrón): limpieza de ladrillos para luego asentarlos en seco con mortero en proporción volumétrica 1:4 (cemento-arena).
- Técnica B: similar a la técnica A, para luego curar las juntas con una brocha húmeda después de 3 horas del asentado durante 3 días.
- Técnica C: similar a la técnica A, pero se usó mortero con cal en proporción volumétrica 1:1/2:4 (cemento-cal-arena).

Los ladrillos fueron tipo King Kong de concreto y se realizaron ensayos de compresión de pilas, compresión diagonal de muretes, compresión del mortero y de piezas. Igualmente, se evaluó el porcentaje de ranuras, variabilidad dimensional, alabeo y succión de las unidades. La pieza tiene 5 ranuras con resistencia a compresión de 162 kg/cm², la resistencia a compresión fue de 174 kg/cm² y 182 kg/cm² en el primero y segundo morteros, respectivamente. La absorción registró 5 %. La resistencia a compresión diagonal fue 11,19 kg/cm², 10,53 kg/cm² y 12,23 kg/cm² en las técnicas A, B y C.

Basurto [7] ensayó tres muretes con un valor medio de la resistencia a compresión diagonal de 7,59 kg/cm². El mortero utilizado tiene una proporción cemento-arena en volumen de 1:7 con una resistencia promedio de 243 kg/cm². Un lote de 20 tabicones registró una resistencia de 130,16 kg/cm².

Gamboa [8] evaluó la resistencia a compresión axial y al corte puro de ladrillos King Kong de concreto, fabricados artesanalmente en Cajabamba, Perú. Se ensayaron un total de 20 pilas y 12 muretes. La resistencia a compresión diagonal máxima fue 6,43 kg/cm². El mortero registró 87,31 kg/cm² y en las piezas, 81,88 kg/cm².

Contreras y Hernández [9] realizaron pruebas en piezas de tabicón pesado con los siguientes parámetros de diseño: a) resistencia de la pieza, 56,02 kg/cm²; b) resistencia a compresión de la mampostería, 38,58 kg/cm²; c) resistencia a compresión diagonal de la mampostería, 8,24 kg/cm².

Pérez et al. [10] utilizaron un bloque multiperforado de concreto de 12 x 20 x 30 cm con el cual se elaboraron 10 pilas de 40 x 60 cm formadas por tres piezas enteras y 10 muretes de 60 x 60 cm, con tres piezas completas y 3 medias piezas. Los parámetros de diseño resultaron: a) resistencia a compresión del mortero, 210 kg/cm²; b) resistencia a compresión de la pieza, 97,4 kg/cm², c) resistencia a compresión de pilas, 81,00 kg/cm² y d) resistencia a compresión diagonal, 11,8 kg/cm².

Sánchez et al. [11] revisaron un total de 13 investigaciones experimentales realizadas entre 2000 y 2016, donde se utilizaron piezas de tabique, tabicón y bloque hueco. Los valores de resistencia de diseño a compresión diagonal varían, los máximos se obtuvieron en tabique rojo pegado con mortero tipo I, 5,1 kg/cm² y 9,9 kg/cm². En tabicón, los valores máximos obtenidos con mortero tipo I fueron 7 kg/cm² y 7,9 kg/cm²; por último, en el bloque hueco se usó mortero tipo II y el valor fue 4 kg/cm².

Zepeda y Alcocer [12] ensayaron tabiques tipo multex y vintex, la resistencia promedio fue de 178 kg/cm² y 224 kg/cm², respectivamente, con una absorción de agua de 17 y 16 %, respectivamente. Las piezas fueron unidas con mortero tipo I mediante una junta de 1 cm de espesor con cemento puzolánico. En total se ensayaron 9 muretes y 9 pilas. La resistencia a compresión diagonal fue de 8,7 kg/cm² y a compresión resultó de 53,51 kg/cm².

De Gante et al. [13] ensayaron ladrillos de barro recocido pegados con mortero: I, II y III con cal adicionada. La resistencia de diseño a compresión del mortero fue de 124, 88,67 y 29,33 kg/cm², respectivamente, mientras que la resistencia a compresión de la pieza fue 52,45 kg/cm². Por otro lado, la resistencia a compresión diagonal fue de 14,24 kg/cm² en mortero I, 13,75 kg/cm² en mortero II y 8,73 kg/cm² en mortero III.

Materiales y métodos

En la elaboración de la mezcla de mortero se

utilizó cemento, cal y arena. La arena se obtuvo del banco de Mezcala (Iguala, México), y se le realizaron pruebas de granulometría con la norma mexicana [3] utilizando un agitador mecánico y las mallas 4, 8, 16, 30, 50, 100 y 200.

Las dosificaciones se definieron a partir de ensayos previos de especímenes cúbicos y cilíndricos. Así, se seleccionaron las dosificaciones D2 y D4, con las cantidades de cal presentadas en la Tabla 2, ya que resultados anteriores mostraron la influencia favorable de la cal. La mezcla fue elaborada en una mezcladora. Se elaboró un lote de 6 cubos de cada dosificación para el ensayo de compresión (Figura 1). También se elaboraron cilindros de mortero. Al mortero fresco se le realizó la prueba de fluidez y revenimiento con el fin de determinar la trabajabilidad de la pasta.

Tabla 2. Dosificación de mortero (en kg). Fuente: elaboración propia (2021).

	Cemento	Cal	Arena	Agua
D2	1,00	0,25	3,56	0,93
D4		0,08		



Figura 1. Llenado de moldes cúbicos.

Fuente: elaboración propia (2021).

Materiales y especímenes

La pieza es tabicón ligero de 9 x 13 x 27 cm, la resistencia a compresión media y de diseño fue de 39,3 kg/cm² y 22,5 kg/cm² y la absorción de 27,3 %. En total se elaboraron 4 muretes de 40 x 42 cm para cada dosificación. Un oficial de la construcción elaboró los especímenes con pieza y media de ancho y cuatro hiladas como lo marca la norma. Las piezas que se utilizaron se usaron en seco (Figura 2). Los muretes fueron instrumentados colocando marcos metálicos en cuatro puntos (Figura 3), y fijando extensómetros en ambas caras para obtener la deformación durante el ensaye. También se colocó una celda de carga en la parte superior del murete para registrar la carga, con esto fue posible obtener tanto la resistencia como la curva de esfuerzo o deformación en cuatro muretes.



Figura 2. Construcción de muretes.

Fuente: elaboración propia (2021).



Figura 3. Instrumentación de murete.

Fuente: elaboración propia (2021).

Para la resistencia a compresión se elaboraron 8 pilas con una altura de 5 piezas. Las dimensiones promedio fueron 51 x 27 x 13 cm (alto, largo y ancho) (Figura 4), las cuales se cabecearon con una capa de concreto con un espesor de 5 mm, con el objetivo de garantizar que la carga durante el ensayo se transmitiera de manera uniforme (Figura 5).

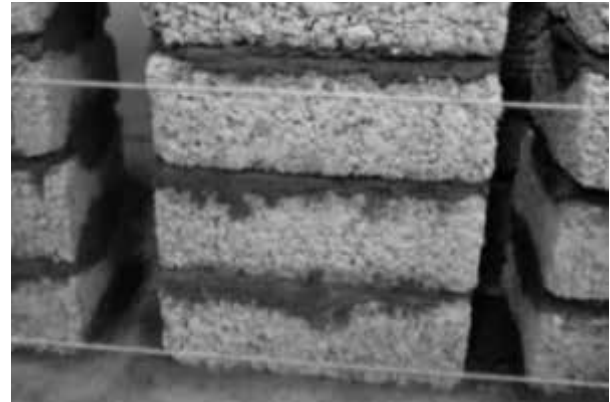


Figura 4. Fabricación de pilas.

Fuente: elaboración propia (2021).



Figura 5. Instrumentación de pila.

Fuente: elaboración propia (2021).

Según el euro código 6 [14], la resistencia al corte de la mampostería se define como la suma del corte inicial y una contribución en la compresión-tensión. El espécimen está formado por tres piezas (Figura 6). Se ensayaron en total 10 pilas de adherencia.



Figura 6. Instrumentación de pila de adherencia.
Fuente: elaboración propia (2021).

Resultados

La Figura 8 muestra la gráfica de la curva granulométrica obtenida, la arena está bien graduada porque está entre los límites y su módulo de finura es 2,49, por lo que cumple con el rango especificado (2,30 a 3,10).

Tabla 3. Resultados de las prueba de arena.
Fuente: elaboración propia (2021).

Pruebas	Resultados
Humedad	2,14 %
Peso volumétrico suelto seco (PVSS)	1.560 t/m ³
Peso volumétrico compacto seco (PVCS)	1.639 t/m ³
Absorción	2,43 %
Densidad	2,50 %
Módulo de finura	2,49
Contenido de materia orgánica	Negativo

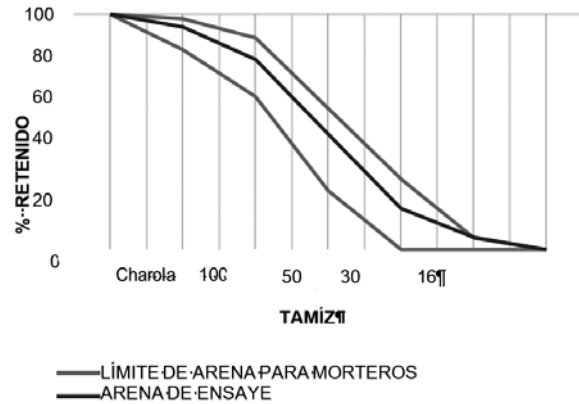


Figura 8. Granulométrica de arena del banco "Mezcala".
Fuente: elaboración propia (2021).

Mortero

La fluidez registró 90 % y 100 % en las dosificaciones D2 y D4, respectivamente. En el mismo orden, el revenimiento fue de 24 cm y 28 cm (Figuras 9 y 10), respectivamente.



Figura 9. Prueba de revenimiento.
Fuente: elaboración propia (2021).



Figura 10. Prueba de fluidez.

Fuente: elaboración propia (2021).

Para el mortero se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 4, el coeficiente de variación (c_j) en las dosificaciones D2 y D4 fue de 0,04 y 0,17, respectivamente. En el cálculo se utilizó el valor normativo igual a 0,20. En la Tabla 5 se muestran los resultados de los cilindros; los coeficientes de variación fueron 0,05 y 0,07 en las dosificaciones D2 y D4. Como se observa, existe diferencia entre ambos resultados, la resistencia a compresión es mayor en los cubos que en los cilindros (Figura 13). Las resistencias de diseño (f'_j) se obtuvieron de acuerdo con la norma.

Tabla 4. Resistencia a compresión (f'_j) en cubos (kg/cm²).

Muestra	D2	Muestra	D4
1	149,9	1	170,2
2	165,4	2	167,3
3	162,9	3	168,9
4	152,7	4	131,2
5	152,9	5	112,1
6	157,5	6	129,7
Promedio	156,9	Promedio	146,6
c_j	0,20	c_j	0,2
f'_j	104,6	f'_j	97,7

Fuente: Elaboración propia (2021).

Tabla 5. Cálculo del esfuerzo en cilindros de mortero (kg/cm²).

Muestra	D2	D4
1	107,4	119,0
2	109,9	116,6
3	111,4	111,8
4	108,5	98,4
5	108,3	105,2
6	123,4	103,5
Promedio	111,5	109,1
c'_j	0,20	0,20
f'_j	98,2	92,1

Fuente: elaboración propia (2021).



Figura 11. Ensaye de cubos.

Fuente: elaboración propia (2021).



Figura 12. Ensaye de cilindros.

Fuente: elaboración propia (2021)

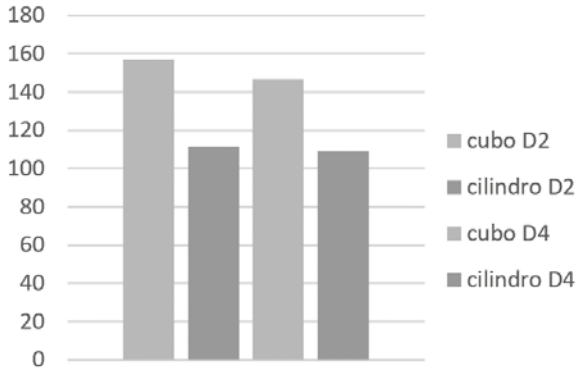


Figura 13. Resistencia promedio a compresión kg/cm².

Fuente: elaboración propia (2021)

Resultados de muretes

En la Tabla 6 se muestran los resultados de la prueba de compresión diagonal, resistencias, coeficiente de variación y módulo de cortante de las dosificaciones D2 y D4. La resistencia de diseño (v'_m) se realiza con la ecuación 1, se utilizó el coeficiente de variación normativo de 0,20 [5] ya que el experimental fue menor. La Figura 14 muestra un murete ensayado con una falla por tensión diagonal, y la Figura 15 presenta los modos de falla posibles.

$$v'_m = (v_m) / (1 + 2.5c_v) \quad (1)$$

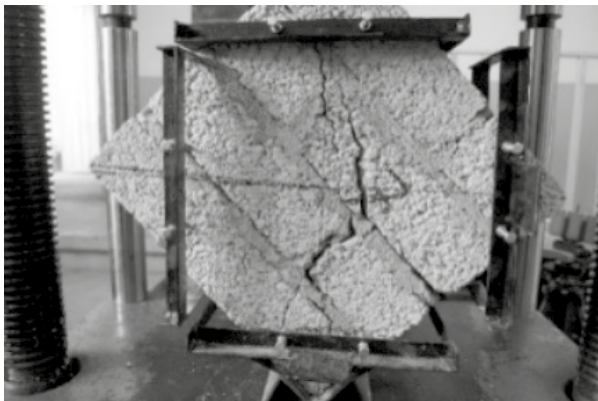


Figura 14. Ensaye de murete 7, falla por tensión diagonal.

Fuente: elaboración propia (2021).

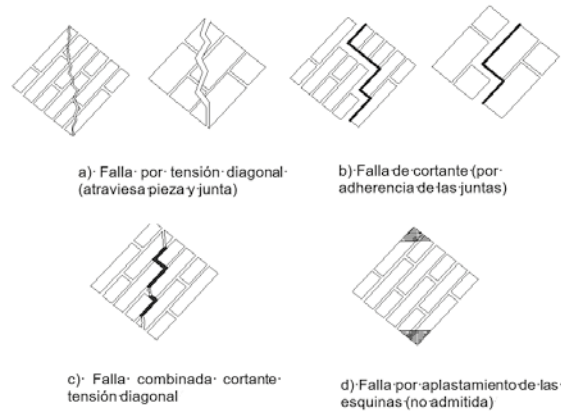


Figura 15. Fallas en muretes.

Fuente: [15].

Tabla 6. Resistencia a compresión diagonal (kg/cm²).

Dosificación	Muestra	Esfuerzo	Fallas	Módulo de cortante (kg/cm ²)	
D2	M1	8,78	Por aplastamiento de la pieza	26.283	
	M2	7,48	Por tensión diagonal		
	M3	7,81	Por aplastamiento de la pieza		
	M4	9,12	Por tensión diagonal		
	Promedio	8,30			
	c_v	0,20	Se considera el mayor valor de la norma y el experimental (0,09)		
	v'_m	5,53			
D4	M5	7,25	Mixta	17.673	
	M6	7,87	Falla por tensión diagonal		
	M7	7,52	Por tensión diagonal	16.469	
	M8	8,82	Por tensión diagonal	18.873	

Dosificación	Muestra	Esfuerzo	Fallas	Módulo de cortante (kg/cm ²)
D4	Promedio	7,87		19.825
	c_v	0,20	Se considera el mayor valor de la norma y el experimental (0,09)	
	v'_m	5,24		

Fuente: elaboración propia (2021).

En la Figura 16 se muestra la gráfica de esfuerzo deformación tangencial de los muretes 4, 5, 7 y 8, el primero pertenece a la dosificación D2 y los tres últimos a la dosificación D4. La deformación de cada diagonal se calculó al dividir el acortamiento entre la longitud instrumentada, y la distorsión angular se determinó sumando la deformación unitaria de la diagonal a compresión más la deformación unitaria de la diagonal a tensión.

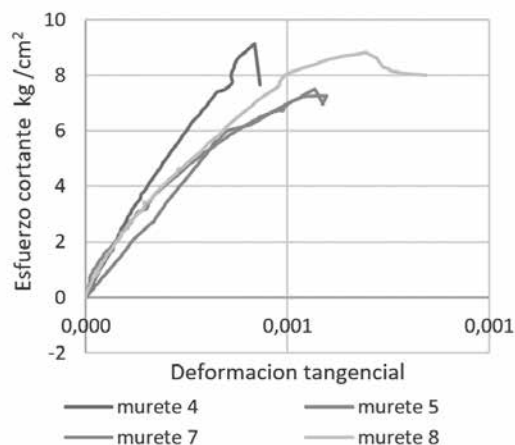


Figura 16. Gráfica de esfuerzo de deformación tangencial de muretes.

Fuente: elaboración propia (2021).

Resultados de pilas de compresión

La Tabla 7 muestra los resultados de la prueba en la resistencia a compresión en pilas de ambas dosificaciones D2 y D4. En la dosificación D2 se tomó el coeficiente de variación experimental y en la dosificación D4 se utilizó el normativo porque el experimental fue 0,10. La resistencia de diseño, f'_m , se obtiene con una ecuación similar a la ecuación (1). La Figura 17 muestra una pila de ensaye con falla de aplastamiento de pieza, y en la Figura 18 se exponen los tipos de fallas que pueden obtener las pilas.



Figura 17. Ensayo de pila 5, falla por aplastamiento de pieza.

Fuente: elaboración propia (2021).

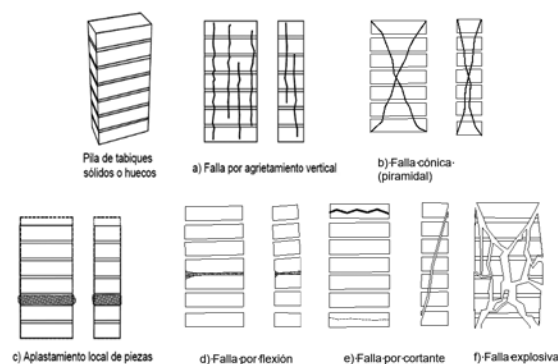


Figura 18. Fallas de las pilas.

Fuente: [15].

Tabla 7. Resistencia de diseño a compresión (f'_m) kg/cm^2 .

	Muestra	Esfuerzo	Falla
D2	M1	24,04	Falla vertical
	M2	19,94	Aplastamiento de pieza
	M3	28,54	Falla vertical
	M4	23,65	Falla vertical
	Promedio	24,04	
	c_m	0,15	
	f'_m	17,49	
D4	M5	19,83	Aplastamiento de pieza
	M6	25,37	Falla local en pieza
	M7	23,86	Falla vertical y en pieza
	M8	25,21	Falla vertical
	Promedio	23,57	
	c_m	0,15	
	f'_m	17,14	

Fuente: elaboración propia (2021).

Resultados de pilas de adherencia

La Tabla 8 muestra los esfuerzos y fallas obtenidos en las pilas de adherencia. En la Figura 19 se muestra un espécimen ensayado con una falla de junta. Las pilas tuvieron fallas en junta, pieza o mixta. El valor medio es de 2,26 kg/cm^2 y 3,50 kg/cm^2 .



Figura 19. Ensayo de pila de adherencia falla mixta.
Fuente: elaboración propia (2021).

Tabla 8. Ensayo de pilas de adherencia (kg/cm^2).

Dosificación	Espécimen	Esfuerzo	Falla
D2	1	2,46	Falla de junta
	2	2,79	Falla de junta
	3	1,32	Falla de junta
	4	2,27	Falla de junta y pieza
	5	2,48	Falla de junta
	Promedio	2,26	

Dosificación	Espécimen	Esfuerzo	Falla
D4	6	4,39	Falla de junta y pieza
	7	2,28	Falla de junta y pieza
	8	3,47	Falla de pieza
	9	3,36	Falla de pieza
	10	3,99	Falla de pieza
	Promedio	3,50	

Fuente: elaboración propia (2021).

Discusión de resultados

Con respecto a la consistencia en estado fresco se observa que la mezcla tenía un estado manejable con valores de fluidez igual a 90 y 100 %, la primera es respecto al valor normativo (105 a 130 %). La mezcla obtuvo un revenimiento de 24 cm en la dosificación D2 y de 28 cm en la dosificación D4. Ambos no cumplen el valor de 16 cm de la norma. En cuanto a la resistencia a compresión (f'_j) del mortero, se obtuvieron valores similares en las dos dosificaciones D2 y D4, pero se nota la influencia de la cal. En los cubos, la resistencia aumentó 7 % en la dosificación D2 con respecto a la D4. Sin embargo, en ningún caso se alcanzó el valor especificado del mortero tipo I igual a 125 kg/cm². La resistencia de diseño a compresión diagonal (v'_m) de ambas dosificaciones es parecida, con un aumento de 6 % en la dosificación D2 respecto a la D4. La misma condición se repite para la resistencia a compresión f'_m . La resistencia de diseño a compresión diagonal aumentó 250 % con respecto al valor de la norma (2 kg/cm²), caso inverso de la resistencia, donde fue menor a 20 kg/cm². En el módulo de cortante, el promedio es 19.825 kg/cm².

Conclusión

Con base en los resultados, y con respecto a las propiedades del mortero fresco, el revenimiento no cumple la norma, mientras que la fluidez cumple en un caso.

Con respecto a la resistencia del mortero, la resistencia a compresión de diseño no alcanzó 125 kg/cm², por lo que es un mortero tipo II, hay un incremento marginal asociado a la mayor cantidad de cal. La resistencia es mayor en muestras cúbicas. En ambas dosificaciones, la resistencia de diseño a compresión diagonal, superior a 5,0 kg/cm², es alta con respecto al valor normativo de 2 kg/cm² y parecida a la reportada en trabajos locales. Otra vez se observa un incremento marginal en la dosificación con mayor cantidad de cal. La resistencia de diseño a compresión es baja y no alcanza los 20 kg/cm², especificados en la norma. Finalmente, se puede concluir que la cal mejoró marginalmente la resistencia a compresión y compresión diagonal de la mampostería.

Recomendaciones

Para un mejor resultado de la resistencia a compresión diagonal, se recomienda controlar la relación de resistencias pieza/mortero y realizar más pruebas en especímenes junteados con mortero que incluyan cal.

Referencias

- [1] R. Arroyo Matus, S. Sánchez Tizapa, C. P. Téllez Tapia, y E. R. Guinto Herrera, "Diagnóstico del comportamiento observado en edificaciones durante el sismo de Zumpango, Guerrero, México (Mw= 6.5) del 11 de diciembre de 2011 y propuesta para reducir la vulnerabilidad estructural", *Tlamati*, vol. 5, n.º 2, pp. 22-30, 2014.
- [2] L. M. Buendía Sánchez y E. Reinoso Angulo, "Análisis de los daños en viviendas y edificios comerciales durante la ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017", *Rev. Ing. Sísmica*, n.º 101, pp. 19-35, 2019. doi: 10.18867/ris.101.508.

- [3] Norma Mexicana NMX-C-486-ONNC-CE-2014, "Industria de la construcción-mampostería-mortero para uso estructural-especificaciones y métodos de ensayo", México, D.F., Diario Oficial de la Federación, 7 de noviembre de 2014.
- [4] Norma Mexicana NMX-C-061, "Industria de la construcción- cementantes hidráulicos- determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos", México, D.F., Diario Oficial de la Federación, 2015.
- [5] Gobierno de la Ciudad de México, "Acuerdo por el que se actualizan las Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería de la ciudad de México", Gaceta Oficial de la Ciudad de México, n.º 454, 19 de octubre de 2020.
- [6] A. A. Morante Portocarrero, "Mejora de la adherencia mortero-ladrillo de concreto", tesis de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2008.
- [7] E. Basurto Porfirio, "Estudio analítico-experimental del comportamiento sísmico de unidades habitacionales en la ciudad de Zihuatanejo, Guerrero", tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma de Guerrero, México, 2013.
- [8] D. E. Gamboa Castro, "Determinación de la resistencia a compresión axial y resistencia al corte puro de la albañilería de ladrillos King Kong de concreto fabricados artesanalmente en la ciudad de Cajabamba", tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca, 2017. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1009>
- [9] J. Contreras Mojica, y O. I. Hernández Sánchez, "Propiedades mecánicas de la mampostería a base de tabique rojo recocido, block hueco, tabicón ligero y tabicón pesado, de la zona centro del estado de Guerrero", tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Guerrero, Chilpancingo, Guerrero, 2012.
- [10] J. Á. Pérez Gómez, F. Flores Cruz, y R. Cruz y Serrano, "Muros de mampostería con bloques multiperforados de concreto", 2004. Disponible en: <https://docplayer.es/24151162-Muros-de-mamposteria-con-bloques-multiperforados-de-concreto-resumen.html>
- [11] S. Sánchez Tizapa, A. Villaseñor Franco, E. Guinto-Herrera, R. Barragán-Trinidad, y A. Mebarki, "Propuesta de valores de referencia para la resistencia de diseño a compresión diagonal y compresión de la mampostería en el estado de Guerrero, México," *Alconpat*, vol. 7, n.º 3, pp. 231-246, septiembre 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.159>
- [12] J. A. Zepeda, y S. M. Alcocer, *Comportamiento ante cargas laterales de muros de arcilla, perforado y multiperforado*. México: Cenapred. Área de Ingeniería Estructural y Geotecnia, 2011.
- [13] J. De Gante Gonzales, S. Contreras Bonilla, H. Torres Díaz, y S. Serrano Vega, "Obtención de propiedades de piezas de mampostería, empleadas en las construcciones de la ciudad de Puebla", *Journals of Chemical Information and Modeling*, vol. 53, n.º 9, pp. 1689-1699, 1981.
- [14] M. Tomazevic, "Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: Shear versus tensile strength of Masonry", *Materials and Structures*, vol. 42, n.º 7, pp. 889-907, 2009.
- [15] Norma Mexicana NMX-C-464, "Industria de la construcción, mampostería, determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería", México, D.F., Diario Oficial de la Federación, 2010.



Ciencias de Datos aplicada a la optimización de la enseñanza de Técnica de Elicitación de Requisitos

Lina María Montoya Suárez¹, Giuliana Fois², Paola Verónica Britos³, Maximiliano Donadio⁴, Gustavo Agüero⁵, Pablo Enrique Argañarás⁶, Martín René Vilugrón⁷, Rodrigo Alejandro Arce⁸

Recibido: 12 marzo 2021. Aprobado: 29 abril 2021.

Resumen: El desarrollo de software es un proceso riesgoso y difícil de controlar, más si no se lleva una metodología y estándar para este proceso. Las metodologías de desarrollo de software han evolucionado a partir de los modelos tradicionales del ciclo de vida, una de las fases principales para la obtención de necesidades es la elicitación de requisitos durante el análisis. El objeto de estudio tiene como premisa aplicar ciencias de datos para analizar qué técnica es más óptima para la enseñanza de elicitación de requisitos ya sea magistral o lúdica.

Palabras clave: Ciencia de datos. Ingeniería de Requisitos, Ingeniería de Software, Requisitos, Análisis de software.

Abstract. Software development is a risky and difficult process to control, especially if a methodology and standard are not followed for this process, software development methodologies have evolved from traditional life cycle models, one of the main phases to obtain needs is the elicitation of requirements during the analysis. The object of study, has as a premise to apply data science to

1 Lina María Montoya Suárez. Ingeniera de Sistemas - Magíster en Ingeniería de Software. Universidad Católica Luis Amigó, Grupo de Investigación SISCO. Medellín, Colombia. Correo electrónico: lina.montoyasu@amigo.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4381-1164>

2 Giuliana Fois. Técnica Universitaria en Programación. Universidad Nacional de Río Negro. Laboratorio de Informática Aplicada. Viedma, Argentina. Correo electrónico: gfois@unrn.edu.ar ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6062-200X>

3 Paola Verónica Britos. Dra. en Ciencias Informáticas. Universidad Nacional de Río Negro. Laboratorio de Informática Aplicada. El Bolsón - Río Negro, Argentina. Correo electrónico: pbritos@unrn.edu.ar ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8846-4744>

4 Maximiliano Donadio. Estudiante de Licenciatura en Sistemas. Universidad Nacional de Río Negro. Laboratorio de Informática Aplicada. El Bolsón, Argentina. Correo electrónico: maxdonadio21@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1573-6163>

5 Gustavo Agüero. Técnico Universitario en Programación. Universidad Nacional de Río Negro. Laboratorio de Informática Aplicada. Viedma - Río Negro, Argentina. Correo electrónico: gustavo54ar@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5996-6876>

6 Pablo Enrique Argañarás. Ingeniero en Computación. Universidad Nacional de Río Negro. Laboratorio de Informática Aplicada. Río Negro, Argentina. Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Bariloche. S. C. Bariloche - Río Negro, Argentina. Correo electrónico: parganaras@unrn.edu.ar ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9386-1496>

7 Martín René Vilugrón. Licenciado en Sistemas. Universidad Nacional de Río Negro. Laboratorio de Informática Aplicada. S.C. Bariloche - Río Negro, Argentina. Correo electrónico: mrvilugron@unrn.edu.ar ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0998-3205>

8 Rodrigo Alejandro Arce. Estudiante de Licenciatura en Sistemas. Universidad Nacional de Río Negro. Laboratorio de Informática Aplicada. Viedma - Río Negro, Argentina. Correo electrónico: rarce@unrn.edu.ar ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6451-2238>

analyze which technique is more optimal for the teaching of elicitation of requirements, whether it is masterful or playful.

Keywords: Data science Requirements Engineering, Software Engineering, Requirements, Software analysis.

Introducción

La Ingeniería de Software es una rama de la ingeniería que brinda métodos y técnicas para desarrollar y mantener softwares de calidad. Además, aborda todas las fases del ciclo de vida del desarrollo de cualquier tipo de sistema de información. En la actualidad, se han detectado falencias en el desarrollo de software, algunas de ellas son: comprender las necesidades de los clientes, desarrollar software con calidad, cumplir con las fases de entrega en el tiempo estipulado, hacer modificaciones a los requisitos; en resumen, esta problemática es el tema principal del presente trabajo, como se describe a continuación [1], [2], [3]:

- Al cliente se le dificulta explicar lo que necesita.
- Falta comunicación en los equipos de desarrollo.
- Los requisitos son cambiantes, incompletos y complejos de medir.
- Los requisitos están expresados en lenguaje natural que es inherentemente ambiguo.

Referente a lo anterior, la ingeniería de requisitos es una tarea compleja, la cual consiste en extraer toda la información posible del dominio del problema, para su posterior diseño e implementación. Lograr una mayor interacción y participación de las partes interesadas es de suma importancia para reducir cambios en los requerimientos durante las fases posteriores del proyecto, con el costo que acarrea dicha situación [3], [4].

Hacer el seguimiento a los requisitos en desarrollo de software es una tarea compleja, todos los artefactos de software sufren modificaciones en el tiempo, lo cual se debe, principalmente, a los cambios en las necesidades de los usuarios, que pueden presentarse por diversas causas, pues un cambio en una fase de desarrollo provoca una

“reacción en cadena” en los diferentes modelos conceptuales (diagramas de casos de usos, diagramas de clases, modelo entidad relación, ciclo de vida del software, etc.) [4], [6].

Enseñar ingeniería de requisitos es fundamental para los proyectos de desarrollo de software, ya que los requisitos marcan el punto de inicio y el fin de actividades como la planeación [7].

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo aplicar ciencias de datos para analizar el método de enseñanza mediante el cual los estudiantes logran la adquisición y el desarrollo de habilidades para el levantamiento de requisitos. Para dar respuesta al desarrollo de las habilidades en los estudiantes, es necesario llevar a cabo una revisión sobre la literatura disponible acerca de las teorías del aprendizaje, la enseñanza con componente lúdico y estrategias didácticas, y su aplicación en la enseñanza en el aula de clase.

Problema

El aprendizaje de las diversas técnicas de elicitación de requisitos es un tema central para la formación de los futuros ingenieros de sistemas, por eso es fundamental identificar cuál es la mejor forma de impartir estos conocimientos y así poder lograr el objetivo de aprendizaje. En la temática de “Técnicas de elicitación de requisitos” para la fase de análisis de desarrollo que está inmersa en el curso de Ingeniería de Software, se aplicaron dos formas de enseñar: de manera magistral y lúdica.

Marco teórico

Requisitos de software

El requisito es “la etapa principal de un ciclo de vida de un desarrollo de software”, como el análisis, el diseño, la codificación, prueba y gestión de cambio, donde se limita a recopilar y analizar las necesidades y objetivos deseados para el sistema desde diferentes puntos de vista [2], [4], [7].

En la etapa del diseño y la perspectiva de arquitectura de software se da valor y relevancia a la definición de las necesidades, que se traducen a requisitos funcionales, requisitos no funcionales

y reglas de negocio [3], [8], [9].

Los requisitos son los que permiten especificar lo que debe realizar y lo que cumplirá el sistema, lo cual consiste en el proceso de comprender y definir qué servicios se requieren del sistema, así como la identificación de las restricciones sobre la operación y el desarrollo del software [3], [10],[11].

Es una etapa inicial que es crítica en el proceso de software, porque los errores en esta fase conducen de manera inevitable a problemas futuros, tanto en el diseño como en la implementación del sistema [4], [1].

Ciencia de datos

La ciencia de datos es una ciencia multidisciplinar, ya que involucra la estadística, la matemática y la ingeniería de datos, entre otros campos, para desarrollar procesos, técnicas y sistemas que extraigan conocimiento de grandes volúmenes de fuentes de información diversas y complejas. El término también es conocido para nombrar el estudio de datos masivos que generan tanto las personas como los sensores y distintos dispositivos.

Fois, Agüero y Britos [12], desde la perspectiva de la ciencia de datos, realizan una comparación de metodologías ágiles para aplicar en proyectos de ciencias de datos, de donde se han tomado las actividades más esenciales para planificar cómo resolver el problema y organizar las actividades para abordar este caso de estudio.

En 2008, Anaya [8] propuso distintos procesos de explotación de la información para poder llevar adelante las distintas fases de estudio.

Antecedentes

A continuación, se mencionan algunos trabajos tomados como antecedentes para el desarrollo de esta investigación:

- L. M. Montoya Suárez y E. Pulgarín Mejía, "Enseñanza en la Ingeniería de software: aproximación a un estado del arte", Lámpsakos, n.º 10, pp. 76-91, 2013.
- L. M. Montoya Suárez, y J. A. Echeverri Arias, "Estrategias didácticas para enseñar técnicas de elicitación de requisitos", *Encuentro nacional de investigación*, vol. 400, n.º 001.4, p. 91, 2013.
- L. M. Montoya Suárez, E. Pulgarín Mejía, y J. C. Monsalve Gómez, "Estrategias didácticas en el aprendizaje para el levantamiento de requisitos", *La investigación*, vol. 1, p. 393, 2014.
- L. M. Montoya Suárez, "Aplicación de un caso de estudio para la enseñanza de ingeniería de requisitos basado en lúdica en pregrado", *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, 2014.
- E. Jiménez Rey, D. Rodríguez, P. Britos, R. García Martínez, "Caracterización de problemas de aprendizaje basada en explotación de información". En *Memorias del XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, Argentina.
- E. Jiménez Rey, P. Britos, D. Rodríguez, R. García Martínez, "Identificación de problemas de aprendizaje de programación con explotación de información", En *Memorias del XIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, Argentina, 2008, pp. 978-987-24611-0-2. *Workshop de Investigadores en Ciencias de 2009*. 978-950-605-570-7.
- G. Cayú, G. Agüero Cobella, G. Balbarrey, M. Cabrera, C. Cabrera, P. Britos, y P. Vivas, "Building honey-based territorial identity for the Formosa Monte through information exploitation using intelligent systems", *IEEE CACIDI 2016 - IEEE Conference on Computer Sciences*. CABA: IEEE Xplore, 2017, pp. 26-28.
- G. Cayú, M. Castro, G. Agüero Cobella, C. Carrera, F. Difabio, M. Tassara, M. Cambarieri, P. Argañaras, M. Villugron, P. Britos, y G. Balbarrey, "Explotación y visualización de información. Su aplicación a las industrias rionegrinas", *III Jornadas Argentinas de Tecnología, Innovación y Creatividad - III JATIC 2017*, Universidad CAECE, Argentina. Mar del Plata, 2017.
- M. Isaja, P. Pizzingrilli, P. Britos, M. Donadio, G. Foiss, G. Agüero, P. E. Argañaras, M. R. Vilugrón, L. M. Montoya Suárez, P. Britos,

- G. Di Bonis, "Estudio de comportamiento de cultivo de mostaza blanca (*Sinapis alba* L.). Un caso de aplicación con Big Data", XI Congreso Internacional ATICA, 2020. 978-84-18254-84-0. Veracruz. México
- P. V. Britos, L. M. Montoya Suárez, M. R. Vilugrón, M. Donadio, "Ciencia de datos en ingeniería de sistemas virtual y distancia de la Uniremington", XXIII Encuentro Nacional de investigación, 2020, Medellín, Colombia.

Objetivo

En este trabajo nos proponemos identificar la forma más adecuada de enseñar los conceptos de elicitación de requisitos a través de técnicas de ciencias de datos.

Metodología

Este trabajo busca realizar un estudio comparativo y observar el comportamiento de los estudiantes frente a diferentes métodos utilizados para abordar la enseñanza de elicitación de requisitos en proyectos de desarrollo de Software. Para poder llevarlo a cabo, se realizaron unas encuestas a los estudiantes del programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Católica Luis Amigó sede Medellín, pertenecientes al curso de Ingeniería de Software correspondiente al séptimo semestre. Se tomaron datos a partir de una encuesta llevada a cabo para la temática "técnica para la elicitación de los requisitos", en dicho curso, en el semestre 2021-01. La encuesta se aplicó con el objetivo de conocer con cuál de las dos técnicas los estudiantes aprenden mejor la extracción de los requisitos: a través de clases lúdicas o clases magistrales.

Los datos obtenidos constan de 37 registros, con los campos que se muestran en la Tabla 1, 20 registros de clases magistrales y 17 registros de clases lúdicas; posteriormente, se empleó el proceso reglas de comportamiento, indicado por [13], para el cual se utilizó el algoritmo *Random Tree* [14] a través de la herramienta Tanagra [15]. Se seleccionó esta herramienta porque acepta sin problema poca cantidad de datos y cuenta con múltiples algoritmos de análisis.

A continuación, se presentan las reglas obtenidas para cada tipo de clases (magistrales y lúdicas), discriminadas mediante diversas técnicas que desarrollan la capacidad de síntesis y de concentración que estimula el sentido de responsabilidad.

Tabla 1. Campos utilizados.

Campo	Valor
Sexo	<ul style="list-style-type: none"> • Femenino • Masculino
Edad	<ul style="list-style-type: none"> • Campo numérico
Semestre	<ul style="list-style-type: none"> • Valor categórico
Indique qué tipo de clase prefiere	<ul style="list-style-type: none"> • Lúdico • Magistral • Ambas
¿Le pareció divertido e interesante cómo se abordó las técnicas de elicitación de Requisitos?	<ul style="list-style-type: none"> • Sí • No
En su opinión, la dinámica empleada para entender las técnicas de elicitación de requisitos:	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora su entendimiento de conceptos. • Dificulta su proceso de aprendizaje.
Las explicaciones dadas en clase facilitan la comprensión de la temática	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
La información suministrada en la clase es clara	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
La forma como se abordó la temática ha satisfecho mis expectativas	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
El método empleado facilita la comprensión de la temática	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada

Campo	Valor
El método empleado proporciona retroalimentación	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
El trabajo en equipo favorece la construcción de conocimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
La temática abordada permite capturar la atención dirigida del estudiante	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
En la clase Técnicas de elicitación de requisitos, considera que el conocimiento adquirido es:	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
Con lo visto en clase, ¿considera que tiene los criterios para identificar técnicas de elicitación de requisitos?	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
La clase que recibió le genera motivación por aprender	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
El interés que le despierta por aprender la temática técnicas de elicitación de requisitos es:	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
La metodología para acceder al aprendizaje le hace sentirse competente para aprender	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada
Lo explicado en clase favorece su atracción por aprender técnicas de elicitación de requisitos	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada

Campo	Valor
La forma de abordar la clase profundiza los contenidos de los temas	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho • Bastante • Regular • Poco • Nada

Análisis de los resultados

Lo resultados obtenidos para el estudio son los siguientes:

Análisis para clases magistrales

A continuación, se muestran las reglas obtenidas:

- **SI** Técnica que desarrolla la capacidad de síntesis y de concentración estimula el sentido de responsabilidad dinamiza y distribuye la actividad en grandes grupos = Phillips 66
 - **Y** La clase se trabaja las conductas previas = [Mucho]
 - **Y** La forma como se abordó la temática Ha satisfecho mis expectativas = Mucho ENTONCES
- Tipo de aprendizaje = Magistral (100,00 % de 4 ejemplos)**
 - **O** La forma como se abordó la temática ha satisfecho mis expectativas = Regular ENTONCES
- Tipo de aprendizaje = Magistral (100,00 % de 1 ejemplo)**
 - **O** La clase se trabaja las conductas previas = [Bastante] ENTONCES
- Tipo de aprendizaje = Magistral (100,00 % de 7 ejemplos)**
 - **O** La clase se trabaja las conductas previas = [Regular]
 - La clase se trabaja los conceptos previos = Mucho ENTONCES
- Tipo de aprendizaje = Magistral (100,00 % de 1 ejemplo)**

- **SI** Técnica que desarrolla la capacidad de síntesis y de concentración estimula el sentido de responsabilidad dinamiza y distribuye la actividad en grandes grupos = Entrevista

- **Y** El tiempo utilizado en la clase considera que es suficiente = [Bastante] ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Magistral (100,00 % de 3 ejemplos)

- **SI** Técnica que desarrolla la capacidad de síntesis y de concentración estimula el sentido de responsabilidad dinamiza y distribuye la actividad en grandes grupos = [E Todas las anteriores]⁹

- **Y** En la clase Técnicas de elicitación de Requisitos considera que el conocimiento adquirido es = Regular ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Magistral (100,00 % de 1 ejemplo)

- **SI** Técnica que desarrolla la capacidad de síntesis y de concentración estimula el sentido de responsabilidad dinamiza y distribuye la actividad en grandes grupos = C JAD

- **Y** Las explicaciones dadas en clase facilitan la comprensión de la temática = Mucho ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Magistral (100,00 % de 2 ejemplos)

- **O** Las explicaciones dadas en clase facilitan la comprensión de la temática = Bastante

- **Y** La temática abordada permite capturar la atención dirigida del estudiante = Bastante ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Magistral (100,00 % de 1 ejemplo)

Análisis para clases lúdicas

A continuación, se muestran las reglas obtenidas:

- **SI** Técnica que desarrolla la capacidad de síntesis y de concentración estimula el sentido de responsabilidad dinamiza y distribuye la actividad en grandes grupos = Phillips 66

⁹ Todas las anteriores: las reglas que se incluyen son: A Entrevista, B Prototipo, C JAD, D Phillips 66.

- **Y** La clase se trabaja las conductas previas in [Mucho]

- **Y** La forma como se abordó la temática Ha satisfecho mis expectativas = Bastante ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Lúdico (100,00 % de 2 ejemplos)

- **O** La clase se trabaja las conductas previas = Regular

Tipo de aprendizaje = Lúdico (100,00 % de 3 ejemplos)

- **SI** Técnica que desarrolla la capacidad de síntesis y de concentración estimula el sentido de responsabilidad dinamiza y distribuye la actividad en grandes grupos = Entrevista

- **Y** El tiempo utilizado en la clase considera que es suficiente = Mucho ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Lúdico (100,00 % of 1 ejemplos)

- **O** El tiempo utilizado en la clase considera que es suficiente = Regular ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Lúdico (100,00 % de 1 ejemplo)

- **SI** Técnica que desarrolla la capacidad de síntesis y de concentración estimula el sentido de responsabilidad dinamiza y distribuye la actividad en grandes grupos = [E Todas las anteriores]¹⁰

- **Y** En la clase Técnicas de elicitación de Requisitos Considera que el conocimiento adquirido es = [Mucho] ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Lúdico (100,00 % de 1 ejemplo)

- **O** En la clase Técnicas de elicitación de Requisitos Considera que el conocimiento adquirido es = Bastante ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Lúdico (100,00 % de 5 ejemplos)

¹⁰ Todas las anteriores: las reglas que se incluyen son: A Entrevista, B Prototipo, C JAD, D Phillips 66.

- **SI** Técnica que desarrolla la capacidad de síntesis y de concentración estimula el sentido de responsabilidad dinamiza y distribuye la actividad en grandes grupos = JAD
 - **Y** Las explicaciones dadas en clase facilitan la comprensión de la temática = Bastante
 - **Y** La temática abordada permite capturar la atención dirigida del estudiante = [Mucho] ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Lúdico (100,00 % de 1 ejemplo)

- **SI** Técnica que desarrolla la capacidad de síntesis y de concentración estimula el sentido de responsabilidad dinamiza y distribuye la actividad en grandes grupos = Prototipo ENTONCES

Tipo de aprendizaje = Lúdico (100,00 % de 3 ejemplos)

Luego de ver las reglas obtenidas, se presentan las conclusiones parciales:

- En el caso de los estudiantes que prefieren las técnicas de prototipo, consideran que el mejor aprendizaje es el lúdico, por el contrario, si la técnica es entrevista, consideran que el tiempo utilizado en la clase es suficiente, prefieren las clases magistrales.
- En las clases donde se considera que las técnicas de elicitación de requisitos el conocimiento es bastante, la clase es lúdica.
- Cuando no hay preferencia en las técnicas que desarrollan la capacidad de síntesis y de concentración que estimulan el sentido de responsabilidad, si en las clases se trabajan las conductas previas es regular la clase preferida es lúdica, pero si es bastante, la clase es magistral, al igual que si la forma como se abordó la temática satisface las expectativas.

Conclusiones

El empleo de la herramienta Tanagra para realizar el estudio de ciencia de datos nos permitió distinguir que las clases con mayor aceptación son las magistrales, pero siempre se pone en valor cierto grado de contenido lúdico; además, la herramienta permitió trabajar con pocos registros.

Las preguntas de la entrevista fueron las mismas para todos los alumnos, sin embargo, lo producido por cada uno presenta conceptos distintos o prioriza distintos aspectos según sus necesidades.

Si bien el caso de estudio arrojó datos de importancia, con un conjunto más amplio de información las reglas serían más precisas, por ende, los resultados tendrían mayor porcentaje de confianza.

Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone estudiar otras técnicas aplicadas en ciencias de datos para:

- Rendimiento académico en materias del área informática.
- Rendimiento académico en materias de la Lic. en Agroecología y Tecnicatura en Producción
 - Orgánica de la Universidad Nacional de Río Negro.
- Efectividad en el dictado de materias del área informática y de otras disciplinas con distintas técnicas pedagógicas.
- Estudio de situaciones de rendimiento agropecuario en distintas regiones.

Referencias

- [1] I. Sommerville and G. Kotonya, *Requirements engineering: processes and techniques*, Pearson Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [2] G. Sevilla, S. Zapata, E. Torres y F. Giraldo, "Propuesta de Modelo de Proceso de Ingeniería Distribuida de Requisitos de Software", *Rev. Tecnol. y Cienc.*, n.º 33, pp. 175-193, 2018.
- [3] S. R. Gómez Palomo y E. A. Moraleda Gil, *Aproximación a la ingeniería del software*. Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2020.
- [4] S. L. Buitrón, B. L. Flores-Ríos, y F. J. Pino, "Elicitación de requisitos no funcionales basada en la gestión de conocimiento de los stakeholders", *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 26, n.º 1, pp. 142-156, 2018.

- [5] L. M. Montoya Suárez, "Aplicación de un caso de estudio para la enseñanza de Ingeniería de requisitos basado en lúdica en pregrado", *Encuentro Int. Educ. en Ing.*, 2014. Disponible en: https://scholar.google.es/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=7Y-8silAAAAJ&citation_for_view=7Y-8silAAAAJ:roLk4NBRz8UC
- [6] L. M. Montoya Suárez y E. Pulgarín Mejía, "Enseñanza en la Ingeniería de software: aproximación a un estado del arte", *Lámpsakos*, n.º 10, pp. 76-91, 2013.
- [7] L. M. Montoya Suárez y J. A. Echeverri Arias, "Estrategias didácticas para enseñar técnicas de elicitación de requisitos", *Encuentro Nac. Investig.*, vol. 400, n.º 001.4, p. 91, 2013.
- [8] R. Anaya, "Una visión de la enseñanza de la ingeniería de software como apoyo al mejoramiento de las empresas de software", *Rev. Univ. EAFIT*, vol. 42, n.º 141, pp. 60-76, 2012.
- [9] A. F. D. Escobar, "Introducción a la Calidad."
- [10] A. D. Toro y B. B. Jiménez, "Metodología para la Elicitación de Requisitos de Sistemas de Software", *Inf. Técnico LSI-2000-10*. Fac. Informática y Estadística Univ. Sevilla, 2000.
- [11] F. N. Rodrigues Machado, *Análise e Gestão de Requisitos de Software: Onde nascem os sistemas*. 3.ª ed., São Paulo: Érika, Saraiva Educação S. A., 2018.
- [12] G. Fois, G. A. Agüero, P. V. Britos, "Evaluación comparativa de las metodologías Team Data Science Process TDSP y Analytics Solutions Unified Method for Data Mining ASUM-DM desde la perspectiva de la ciencia de datos", en *Investigación Formativa en Ingeniería*, 4.ª ed., E. Serna M., Ed. Medellín: IAI, 2020, pp. 264-270.
- [13] P. V. Britos, "Procesos de explotación de información basados en sistemas inteligentes", tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata, 2008.
- [14] L. Breiman, "Random forests", *Mach. Learn.*, vol. 45, no. 1, pp. 5-32, 2001.
- [15] Tanagra (2004). TANAGRA: A free data mining software for research and education [En línea]. Disponible en: <https://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/tanagra>

Andrade, Andrés, Calvache, Reynaldo, Illera, José, Potosí, Ángel, Arias, Christian, Gil, Gustavo, (2021). Datamart para el análisis de los hábitos transaccionales de los clientes de una entidad bancaria con el uso del producto tarjeta débito. Cuaderno Activa, 13, 103-111.



Datamart para el análisis de los hábitos transaccionales de los clientes de una entidad bancaria con el uso del producto tarjeta débito

Datamart for the analysis of the transactional habits of Banking Entity customers with the use of the debit card product.

Andrés Felipe Andrade Mayor¹, Reynaldo Manzano Calvache², José Manuel Illera Recalde³, Ángel Antonio Potosí Fajardo⁴, Christian Gustavo Arias Iragorri⁵, Gustavo Eduardo Gil Prado⁶

Recibido: 11 mayo 2021. **Aprobado:** 23 mayo 2021.

Resumen: En este artículo se presentan los resultados del proyecto "Datamart para el análisis de los hábitos transaccionales de los clientes de una entidad bancaria con el uso del producto tarjeta débito", desarrollado como trabajo final en el programa de Especialización en Administración de la Información y Bases de Datos, de la Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca. El objetivo del proyecto fue construir un Datamart que le permitiera a una entidad bancaria generar reportes que apoyaran el proceso de medición y

monitoreo de las costumbres transaccionales de los clientes que hacen uso del producto tarjeta débito. Se empleó la metodología CRISP-DM (*Cross Industry Standard Process for Data Mining*), una de las más utilizados para trabajar con minería de datos, que proporciona una descripción normalizada del ciclo de vida de un proyecto estándar de análisis de datos. Esta metodología consta de seis fases: Definición de necesidades del cliente o comprensión de negocio, estudio y comprensión de los datos, análisis de los datos y

1 Ingeniero de Sistemas. Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca. Popayán, Colombia.

Correo electrónico: aandrade@unimayor.edu.co

2 Matemático. Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca. Popayán, Colombia.

Correo electrónico: reynaldomanzano@unimayor.edu.co

3 Ingeniero de Sistemas. Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca. Popayán, Colombia.

Correo electrónico: joseillera@unimayor.edu.co

4 Ingeniero en Informática. Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca. Popayán, Colombia.

Correo electrónico: aapotosi@unimayor.edu.co

5 Doctor en Ingeniería. Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca. Popayán, Colombia.

Correo electrónico: charias98@unimayor.edu.co

6 Ingeniero de Sistemas. Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca. Popayán, Colombia.

Correo electrónico: gustavo.gilp@unimayor.edu.co

selección de características, modelado, evaluación y despliegue. Se implementó un modelo de topología en estrella en el Datamart utilizando como gestor de base de datos MYSQL. Asimismo, se construyó un sistema ETL (*Extract, transform and load*) que permitió la carga, limpieza y transformación de los datos para que quedaran almacenados en el Datamart. Finalmente, se evaluaron y se interpretaron los resultados con la herramienta Power BI. Este proyecto permitirá a una entidad bancaria analizar de manera detallada el flujo transaccional de los clientes que hacen uso del producto tarjeta débito.

Palabras clave: CRISP-DM, Datamart, ETL, Tarjeta débito, Topología en estrella.

Abstract. This article presents the results of the project "Datamart for the analysis of the transactional habits of Banking Entity customers with the use of the debit card product" developed as a final project in the program of the Especialización en Administración de la Información y Bases de Datos of the Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca that aimed to build a Datamart that allows a Banking Entity to generate reports that support the process of measuring and monitoring the transactional habits of customers who use the product. debit card. The CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining) methodology was used, one of the most used methods to work with data mining, it provides a standardized description of the life cycle of a standard data analysis project. This methodology consists of six phases: Defining customer needs or understanding the business, studying and understanding the data, analyzing the data and selecting features, modeling, evaluating and deploying. A star topology model was implemented in the Datamart using MYSQL as the database manager. Likewise, an ETL (*Extract, transform and load*) system was built that allowed the loading, cleaning and transformation of the data to be stored in the Datamart in a clean way. Finally, the results were evaluated and interpreted with the Power BI tool. The project carried out will allow a Banking Entity to analyze in detail the transactional flow of customers who make use of the debit card product.

Keywords: CRISP-DM, Datamart, Debit Card, ETL, Star Topology.

Introducción

Las entidades bancarias en Colombia atienden diferentes necesidades de los ciudadanos entre las que se encuentran el otorgamiento de créditos de una manera más fácil, rápida y oportuna, desde la introducción de las tarjetas débito y crédito, en la década de 1950, y en la década de 1970 para Colombia, lo cual produjo una revolución en la forma de pago de los consumidores [1], y permitió conocer las actividades que los clientes realizaban a través de estos medios.

Entre los nuevos retos que afronta una entidad bancaria en la actualidad está la creación de nuevas estrategias de negocio con su producto tarjeta débito, y esto tiene que ver con modelos que les permitan analizar la información transaccional de sus clientes. Por la falta de conocimiento acerca de estas estrategias se pierden nuevas oportunidades de negocio que se pueden producir con este tipo de análisis de información.

Con base en lo anterior, el presente proyecto pretende, por medio de un Datamart, apoyar el proceso de medición y monitoreo de los hábitos transaccionales de los clientes que hacen uso del producto *tarjeta débito*. El propósito es incentivar a las entidades bancarias en la creación de nuevas ofertas comerciales que despierten interés en los clientes a partir de conocer los beneficios que pueden obtener al usar los productos transaccionales que se ofrecen.

Metodología

El proyecto se realizó bajo la metodología CRISP-DM (*Cross Industry Standard Process for Data Mining*). El estándar incluye un modelo y una guía estructurados en seis fases, algunas de estas fases son bidireccionales, lo que significa que permiten revisar parcial o totalmente las fases anteriores. El proceso CRISP-DM proporciona una descripción normalizada del ciclo de vida de un proyecto estándar de análisis de datos, de forma análoga a como se hace en la ingeniería del software con los

modelos de ciclo de vida de desarrollo de software [2], [3], [4], [5]. En la Figura 1 se muestran las fases del proceso CRISP-DM.

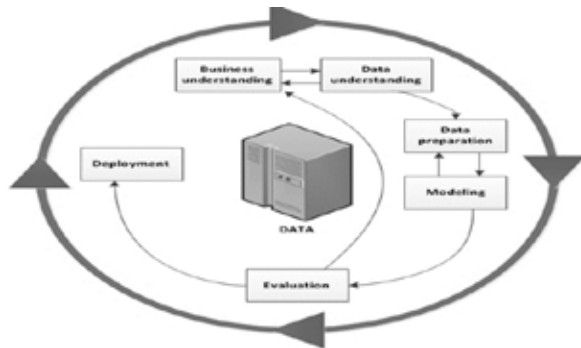


Figura 1. Fases de la metodología CRISP-DM.
 Fuente: tomado de [6].

Fase I. Comprensión del Negocio (*Business Understanding*): se realizan las tareas de comprensión de los objetivos y requisitos del proyecto desde una perspectiva empresarial o institucional, ya que se convierten en objetivos técnicos y en un plan de proyecto [7].

Fase II. Comprensión de los Datos (*Data Understanding*): comprende la recolección inicial de datos con el objetivo de establecer un primer contacto con el problema [7].

Fase III. Preparación de los Datos (*Data Preparation*): en esta fase, una vez efectuada la recolección inicial de datos, se procede a su preparación para adaptarlos a las técnicas de *Data Mining* que se utilicen posteriormente [7].

Fase IV. Modelado (*Modelling*): en esta fase de CRISP-DM se seleccionan las técnicas de modelado más apropiadas para el proyecto de *Data Mining* específico [7].

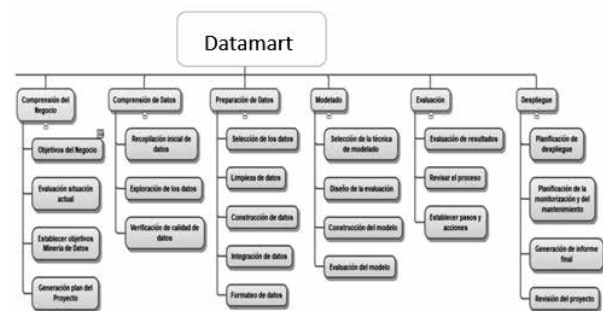
Fase V. Evaluación (*Evaluation*): en esta fase se evalúa el modelo, teniendo en cuenta el cumplimiento de los criterios de éxito del problema [7].

Fase VI. Despliegue (*Deployment*): en esta fase, y una vez que el modelo ha sido construido y

validado, el conocimiento obtenido se transforma en acciones dentro del proceso de negocio, ya sea que el analista recomiende acciones basadas en la observación del modelo y sus resultados, o que el modelo se aplique a diferentes conjuntos de datos o como parte del proceso [7].

En la Figura 2 se despliega el alcance del proyecto y cada uno de sus entregables.

Figura 2. Alcance del proyecto.



Fuente: elaboración propia.

En el proyecto se establecieron los siguientes requerimientos para el proceso:

- R1. Cantidad de transacciones ATM realizadas por los clientes, por fecha, tipo de transacción y código de respuesta.
- R2. Cantidad de transacciones POS realizadas por los clientes, por fecha, tipo de transacción y código de respuesta.
- R3. Cantidad de transacciones ATM nacionales realizadas por los clientes, por tipo de transacción, código de respuesta, monto, nombre departamento y fecha.
- R4. Cantidad de transacciones POS nacionales realizadas por los clientes, por tipo de transacción, código de respuesta, monto, nombre municipio y fecha.
- R5. Cantidad de transacciones ATM relacionadas con retiros nacionales realizadas por los clientes, por tipo de transacción, código de respuesta, monto, fecha y municipio, comparado con el porcentaje de hurto de cada municipio y el porcentaje de hurtos en las entidades financieras.

R6. Cantidad de transacciones POS relacionadas con compras nacionales realizadas por los clientes, por tipo de transacción, código de respuesta, monto, fecha y municipio, comparado con el porcentaje de hurto de cada municipio y el porcentaje de hurtos en las entidades financieras.

R7. Cantidad de transacciones POS, por departamento, municipio, almacén, fecha, código de transacción y código de respuesta.

A continuación, en la Tabla 1 se muestra el desarrollo de la matriz de dimensiones, como solución a los requerimientos definidos en el proyecto.

Tabla 1. Matriz de dimensiones.

	TIEMPO	TIPO_TRNX_ATM	TIPO_TRNX_POS	MUNICIPIO	HURTOS COLOMBIA	HURTOS ENTIDADES FINANCIERAS	COD_RESP_POS	COD_RESP_ATM
R1	X	X						X
R2	X		X				X	
R3	X	X		X				X
R4	X		X	X			X	
R5	X	X		X	X	X		X
R6	X		X	X	X	X	X	
R7	X		X	X			X	

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2 se presenta la descripción de las dimensiones de la Bodega de datos.

Tabla 2. Descripción de dimensiones.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN
transacciones_atm	Tabla donde se encuentra el historial de transacción ATM
transacciones_pos	Tabla donde se encuentra el historial de transacciones POS
dim_ciudad	Esta dimensión contiene código departamento, nombre departamento, código municipio, nombre municipio, zona postal, código postal y tipo (rural o urbano)
dim_codigos_resp_atm	Códigos de respuesta diferentes para cada caso, que se manejan para saber si la transacción es aprobada o rechazada
dim_tipo_tmx_atm	Códigos de los diferentes tipos de transacciones ATM
dim_codigos_resp_pos	Códigos de respuesta diferentes para cada caso, que se manejan para saber si la transacción es aprobada o rechazada
dim_tipo_tmx_pos	Códigos de los diferentes tipos de transacciones POS
din_hurtos_colombia	Se extrae un histórico de hurtos del año 2019 de la pagina de la Policía de los diferentes municipios por entidades financieras y hurtos por delincuencia común, para obtener un porcentaje de criminalidad por cada municipio (número de
dim_hurtos_ef	
dim_tiempo	Esta dimensión contiene las fecha en diferentes formato en un intervalo de tiempo determinado

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 3 se muestra la definición de cubos.

Tabla 3. Definición de cubos.

N°	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	AGREGACIÓN
1	fac_req1_atm	Cantidad de transacciones ATM realizadas por los clientes, por fecha, tipo de transacciones y código de respuesta.	count (cod_tipo_trans)
2	fac_req2_pos	Cantidad de transacciones POS realizadas por los clientes, por fecha, tipo transacción y código de respuesta.	count (cod_trans)
3	fac_req3_atm	Cantidad de transacciones ATM nacionales realizadas por los clientes, por tipo de transacción, código de respuesta, monto, nombre, municipio y fecha.	sum (monto) count (cod_tipo_trans)
4	fac_req4_pos	Cantidad de transacciones POS nacionales realizadas por los clientes, por tipo de transacción, código de respuesta, monto, nombre de municipio y fecha.	sum (monto) count (cod_trans)
5	fac_req5_atm	Cantidad de transacciones ATM relacionadas con retiros nacionales realizadas por los clientes, por tipo de transacción, código de respuesta, monto, fecha y municipio comparado con el porcentaje de hurto de cada municipio y el porcentaje de hurtos en la entidades financieras.	sum (monto) count (cod_tipo_tans)
6	fac_req6_pos	Cantidad de transacciones ATM relacionas con compras nacionales realizadas por los clientes, por tipo de transacción, código de respuesta, monto, fecha, y municipio comparado con el porcentaje de hurto de cada municipio y el porcentaje de hurtos en las entidades financieras.	sum (monto) count (cod_tans)
7	fac_req7_atm	Cantidad de transacciones POS, por departamento, municipio, almacén, fecha, código de transacción y código de respuesta.	sum (monto) count (cod_tans)

Fuente: elaboración propia.

Resultados

Luego de llevar a cabo el proceso mencionado en la metodología, en esta sección se presentan los resultados obtenidos.

1. Como resultado principal se obtuvo un Datamart con un modelo dimensional en topología en estrella de la bodega de datos, que comprende las dimensiones con los movimientos transaccionales POS (*Point of sale*) y ATM (*Automated teller machine*) de las tarjetas débito de una Entidad Bancaria.

2. Un proceso ETL para la carga y transformación periódica de la información proveniente de archivos planos que contienen los movimientos transaccionales por tarjeta débito POS y ATM de una entidad bancaria.

3. La *Dashboard* que facilita la visualización, medición y monitoreo de los hábitos transaccionales de los clientes de una entidad bancaria.

En la Figura 2 se relaciona el modelo dimensional para la bodega de datos.

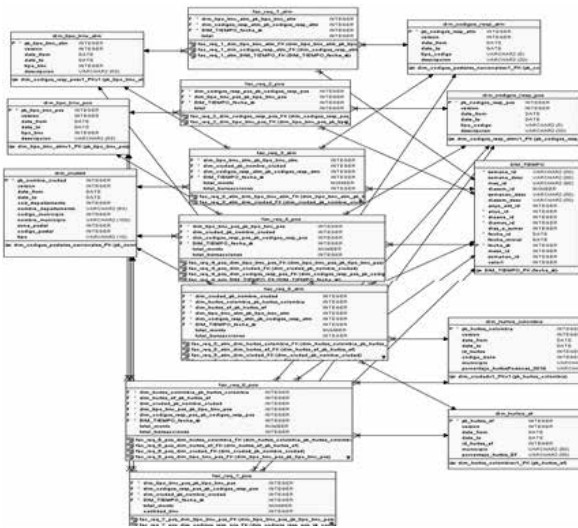


Figura 2. Modelo dimensional.

Fuente: elaboración propia.

En las Figuras 3, 4, 5 y 6 se relaciona el proceso ETL automatizado en la herramienta Pentaho Data Integration (PDI), con la cual es posible presentar los pasos ejecutados en el proceso de transformación que se utilizó en la elaboración de la Bodega de datos y, posteriormente, realizar el análisis de resultados.

En la Figura 3 se muestra el proceso ETL, y se especifica cada paso ejecutado para cargar el historial de transacciones ATM en la Bodega de Datos.

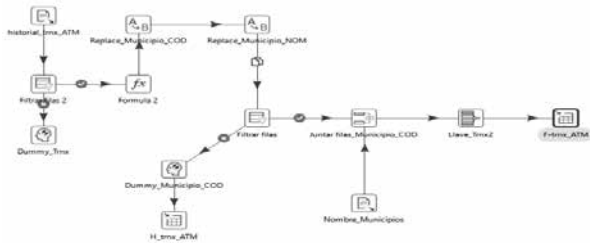


Figura 3. Proceso ETL de transacciones ATM.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4, por su parte, se muestra el proceso ETL especificando cada paso ejecutado para cargar el historial de transacciones POS en la Bodega de datos.

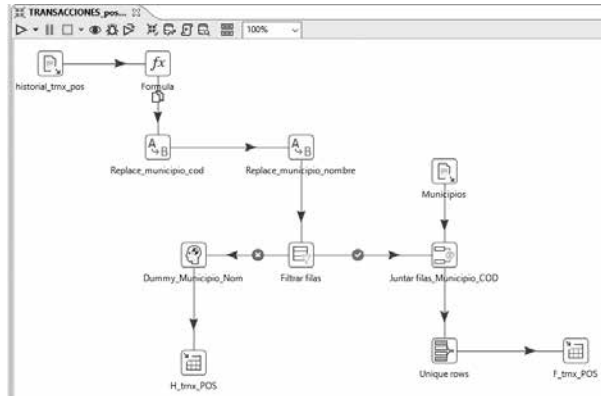


Figura 4. Proceso ETL de transacciones POS.

Fuente: elaboración propia.

Mientras en la Figura 5 se muestra el ETL para cargar las dimensiones ciudad en la Bodega de datos.

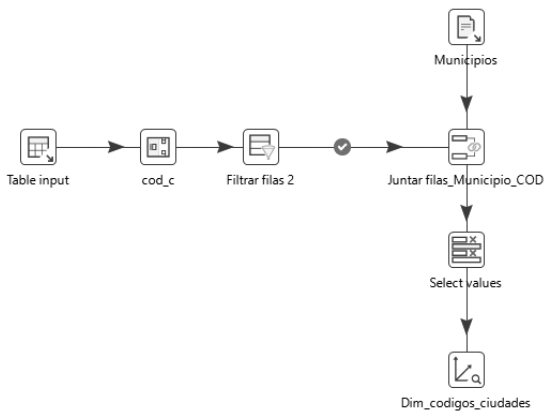


Figura 5. Proceso ETL para dimensión ciudad.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6 se muestra el ETL para cargar la dimensión tiempo en la Bodega de datos.

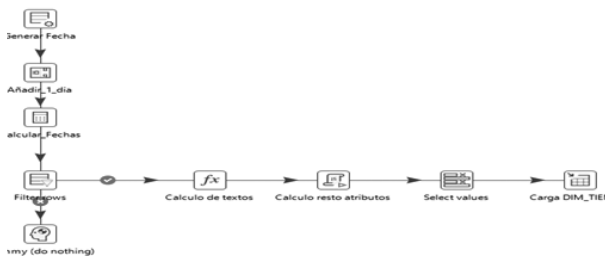


Figura 6. Proceso ETL para dimensión tiempo.

Fuente: elaboración propia.

En las siguientes Figuras (7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13) se relacionan los resultados del *Dashboard* resultante de cada requerimiento, empleando la herramienta de Inteligencia de Negocios Power BI.

Informe Requerimiento 1: en el informe de la Figura 7 se identifica la cantidad de transacciones ATM realizadas por tipo de transacción, respuesta de la transacción y fecha.

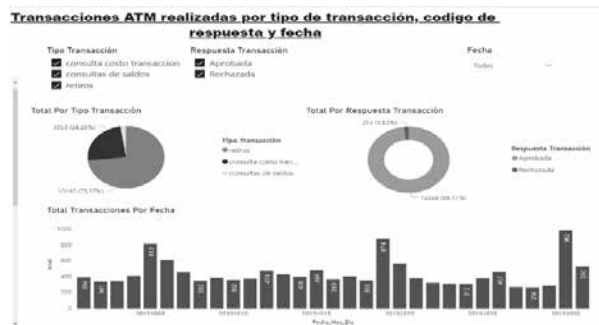


Figura 7. Total de transacciones ATM por tipo, código y fecha.
 Fuente: elaboración propia.

En este reporte, el mayor porcentaje de transacción ATM es de tipo retiro con un 73,37 % y en respuesta de transacciones aprobadas un 98,17 %, además se puede evidenciar el día con mayor número de transacciones ATM por fecha.

Informe Requerimiento 2: en el informe en la Figura 8 se identifica la cantidad de transacciones POS realizadas por tipo de transacción, respuesta de la transacción y fecha.

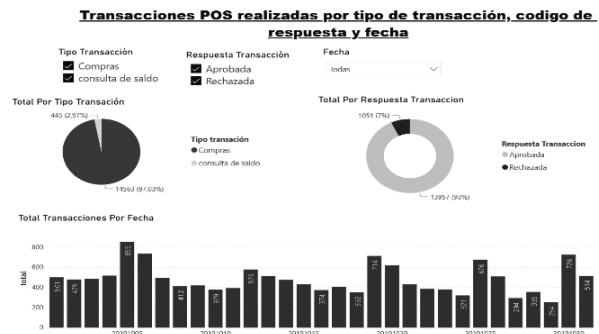


Figura 8. Total de transacciones POS por tipo, código y fecha.
 Fuente: elaboración propia.

En este reporte, el mayor porcentaje de transacción POS es de tipo compras con un 97,03 %, y consulta de saldo, el 2,97 %, en cuanto a la respuesta de las transacciones: aprobadas el 93 % y rechazadas el 7 %, además se puede evidenciar el día con mayor número de transacciones POS por fecha.

Informe Requerimiento 3: en el informe de la Figura 9 se identifica la cantidad de transacciones ATM realizadas por monto, tipo de transacción, respuesta de la transacción, departamento y municipio.



Figura 9. Total de transacciones ATM por monto, departamento y municipio.
 Fuente: elaboración propia.

En este reporte de transacción ATM por monto y departamento, en este caso el Valle del Cauca, de un total de 1.246 transacciones, en el mayor monto por municipio se encuentra Pereira con un 7,2 % y le sigue la localidad de Usaquén con un 6,95 %.

Informe Requerimiento 4: en el informe de la Figura 10 se identifica la cantidad de transacciones POS realizadas por monto, tipo de transacción, respuesta de la transacción, departamento y municipio.



Figura 10. Total de transacciones POS por monto, departamento y municipio.
 Fuente: Elaboración Propia

En este reporte de transacción POS monto por departamento, el Casanare presenta el mayor monto; en el monto por municipio se encuentra Yopal con un 18,67 % de transacciones rechazadas, y le sigue la localidad de Usaquéen con el 11,2 %, de un total de 1.018 transacciones.

Informe Requerimiento 5: en el informe en la Figura 11 se identifica la cantidad de transacciones ATM realizadas por monto, tipo de transacción, respuesta de la transacción, departamento y municipio, teniendo en cuenta el porcentaje de hurtos a personas y entidades financieras.

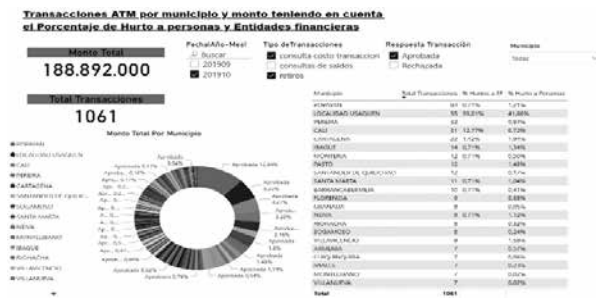


Figura 11. Total de transacciones ATM por municipio, departamento, monto y porcentaje de hurtos a personas y entidades financieras.

Fuente: elaboración propia.

En este reporte de transacción ATM, presenta un porcentaje de hurtos a la entidad bancaria o hurto a personas por municipio. El mayor porcentaje de hurtos a entidad y el mayor porcentaje de hurtos a personas se presentan en la localidad de Usaquéen con el 39,01 % y el 41,66 %, respectivamente, de un total de 1.061 transacciones.

Informe Requerimiento 6: En el informe en la Figura 12 se identifica la cantidad de transacciones POS realizadas por monto, tipo de transacción, respuesta de la transacción, departamento y municipio, teniendo en cuenta el porcentaje de hurtos a personas y entidades financieras.



Figura 12. Total de transacciones POS por municipio, departamento, monto y porcentaje de hurtos a personas y entidades financieras.

Fuente: elaboración propia.

En este reporte de transacción POS, se presenta un porcentaje de hurtos por municipio a entidad bancaria o a personas. El mayor porcentaje de hurtos a la entidad y el mayor porcentaje de hurtos a personas se presentan en la localidad de Usaquéen con el 39,01 % y el 41,66 %, respectivamente, de un total de 1.215 transacciones.

Informe Requerimiento 7: en el informe de la Figura 13 se identifica la cantidad de transacciones POS realizadas por departamento, almacén, monto, tipo de transacción y respuesta a la transacción.



Figura 13. Total, transacciones POS por departamento, monto y almacén.

Fuente: elaboración propia.

En este caso, en este reporte de transacción POS se evidencia que el departamento con mayor monto de transacción es Casanare, y se puede conocer, además, el monto por almacén de un total de 676 transacciones que se realizaron en el mes de octubre de 2019.

Conclusiones

EL Datamart generado brinda información de calidad que ayudará a los directivos de la entidad bancaria a tomar decisiones acertadas y oportunas en lo que tiene que ver con la formulación de estrategias de negocio relacionadas con el producto de tarjetas débito.

El proyecto le permitió a la entidad bancaria analizar de forma detallada el flujo transaccional de los clientes que hacen uso del producto tarjeta débito, mediante la evaluación de la cantidad de transacciones ATM y POS, aprobadas o rechazadas, por departamento, municipio, monto y almacenes.

Se pudo, además, identificar una mayor percepción del riesgo transaccional por índice de hurtos a entidades financieras y personas, en ciudades con mayor flujo transaccional, como fue el caso de la localidad de Usaqué en Bogotá.

En la entidad bancaria se pudieron identificar los canales transaccionales por departamento, municipio y monto, donde se presentan la mayor cantidad de transacciones aprobadas y rechazadas, lo que permitió analizar las causas de por qué se presentan rechazos transaccionales.

Con los resultados obtenidos, se identificaron los almacenes con mayor flujo transaccional, por departamento, municipio, monto y fecha, que podrían generar una posibilidad de alianzas estratégicas comerciales con la entidad bancaria.

En la entidad bancaria se lograron evidenciar los departamentos y municipios con mayor flujo transaccional, lo que permite evaluar la gestión comercial de las agencias.

Referencias

- [1] J. E. Gómez-González, J. Jaramillo-Echeverri, y A. Meisel-Roca, "El uso de efectivo y tarjetas débito y crédito en Colombia," *Borradores Econ.*, n.º 950, 2016.
- [2] A. Azevedo and M. Santos, "KDD, SEMMA and CRISP-DM: a parallel overview", in *Proceedings of IADIS European Conference on Data Mining*, Amsterdam, Netherlands, 2008, pp. 182-185.
- [3] P. Chapman, J. Clinton, R. Kerber, T. Khabaza, T. Reinartz, C. Shearer and R. Wirth, "CRISP-DM 1.0: Step-by-step data mining guide", CRISP-DM consortium: NCR Systems Engineering Copenhagen (USA and Denmark), DaimlerChrysler AG (Germany), SPSS Inc. (USA), and OHRA Verzekeringen en Bank Groep B. V., The Netherlands, 2000.
- [4] J. Hernández, M. Ramírez, y C. Ferri, *Introducción a la Minería de Datos*, Madrid: Pearson Educación, 2005. Disponible en: <http://dspace.ucbscz.edu.bo/dspace/handle/123456789/526>.
- [5] J. Villena, *CRISP-DM: La metodología para poner orden en los proyectos de Data Science*, 2016. Disponible en: <https://data.sngular.team/es/art/25/crisp-dm-la-metodologia-para-poner-orden-en-los-proyectos-de-data-science>
- [6] IBM, "IBM SPSS Modeler CRISP-DM," IBM Corp., 2016.
- [7] Smartbase Group, [En línea]. Disponible en: <https://www.sngular.com/es/data-science-crisp-dm-metodologia/>

Gelves, Óscar, Patarroyo, Estefanía, Nicolás Borrero Puentes, Salgado, Karen (2021). Cal como factor influyente en la resistencia a compresión diagonal de la mampostería. Una revisión. Cuaderno Activa, 13, 73-80.



Diseño de una red de ciclorrutas para la ciudad de Bogotá D. C. por medio del método de árbol de mínima expansión (1)

Óscar Mauricio Gelves Alarcón,¹ Estefanía Patarroyo Alarcón,² Nicolás Borrero Puentes,³ Karen Angélica Salgado Turmequé⁴

Recibido: 5 diciembre 2020. Aprobado: 9 marzo 2021.

Resumen: Una de las necesidades más importantes que tiene la ciudad de Bogotá D. C. actualmente es optimizar sus sistemas de transporte. En los últimos años, los gobiernos distritales han buscado alternativas de movilidad para la ciudad que de alguna manera complementen y despejen los medios tradicionales, es así que se ha incentivado el uso de la bicicleta para mejorar la movilidad y la calidad del aire. Teniendo en cuenta estas necesidades, el Distrito ha construido ciclorrutas dentro de la ciudad y se propone realizar un estudio con el objetivo de diseñar una red de ciclorrutas que tenga la capacidad de unir todas las localidades de Bogotá —a excepción de la localidad de Sumapaz— y con ello establecer trayectos con la mínima distancia posible. Para el diseño de la red se aplica el método del árbol de mínima expansión, el cual

consiste en conectar los nodos de una red y a la vez disminuir la distancia entre ellos, este modelo es utilizado para las conexiones eléctricas o redes de acueducto. Para la aplicación del método del árbol de mínima expansión se determinó que cada localidad tuviera un nodo, el cual se definió como el punto geográfico representativo de cada una, además, se determinaron las distancias entre los nodos representadas en arcos y se definió la red correspondiente. A partir de la red generada, se aplicó el método del árbol de mínima expansión para determinar la conexión de todos los nodos o localidades, teniendo en cuenta la mínima distancia, lo que genera una red conexa, la cual establece la red de la ciclorruta y el trayecto correspondientes para la conexión entre las diferentes localidades.

1 Autor correspondiente: Óscar Mauricio Gelves Alarcón, magíster en Ingeniería de Dirección Industrial. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: oscar.gelves@unimilitar.edu.co ORCID: 0000-0003-0557-775X

2 Autor correspondiente: Estefanía Patarroyo Alarcón. Ingeniera industrial. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: estefaniapatarroyo@usantotomas.edu.co ORCID: 0000-0002-4483-925X

3 Autor correspondiente: Nicolás Borrero Puentes. Ingeniero industrial. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: nicolasborrero@usantotomas.edu.co ORCID: 0000-0003-3825-018X

4 Autor correspondiente: Karen Angélica Salgado Turmequé. Ingeniera industrial. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: karenalagado@usantotomas.edu.co ORCID:

Palabras clave: Problemas de redes, árbol de mínima expansión, ciclorrutas, transporte, algoritmo ruta más corta.

Abstract: One of the most important needs that the city of Bogota D.C. currently has is to optimize its transport systems. In recent years, the district governments have sought mobility alternatives in the city that in some way complement and clear the traditional means of transportation. In this way, the use of bicycles has been encouraged to improve mobility and air quality, taking into account these needs the District has built cycling routes within the city and for this it is proposed to carry out a study with the aim of designing a network of cycling routes that has the capacity to link all the towns of Bogota with the exception of the town of Sumapaz and thus establish a route with the minimum possible distance. For the design of the network, the method of the minimum spanning tree is applied, which consists of connecting the nodes of a network and at the same time reducing the distance between them, in this way, it is used for electrical connections or aqueduct networks. For the application of the minimum expansion tree method, it was determined that each locality had a node, which was defined as the representative geographic point of each one, in addition, the distances between the nodes represented in arcs were determined and the corresponding network was defined. From the generated network, the least-spanning tree method was applied to determine the connection of all nodes or locations taking into account the minimum distance, which generates a connected network that establishes the network of the cycle routes and the corresponding path for the connection between the different localities.

Keywords: Network problems, minimum expansion tree, bike routes, transportation, shortest path algorithm.

Introducción

La ciudad de Bogotá D. C. en la actualidad cuenta con una red de ciclorrutas de 550 km [1], las cuales se encuentran de forma dispersa y algo desordenada, por lo que se han presentado inconvenientes con las conexiones, ya que la construcción de las ciclo rutas se ha determinado en función de las avenidas principales, mas no en el sentido de conectividad (Figura 1).



Figura 1. Mapa de red de ciclorrutas en Bogotá.

Fuente: Tomado de [2].

En la actualidad, se han realizado diferentes estudios para mejorar la movilidad en las ciudades, por ejemplo, en la detección de los modos de transporte más utilizados y su velocidad, según Adarme, la velocidad promedio de una bicicleta se encuentra entre 6 y 20 km/h [3].

Por ser la bicicleta una forma económica y rápida de moverse dentro de las ciudades, se propone como objetivo definir una ciclorruta principal que tenga la capacidad de comunicar todas las

localidades de Bogotá con un mínimo de distancia, para lo cual se decidió utilizar la modelación de redes y, en específico, el algoritmo de árbol de mínima expansión.

Se determinaron entonces puntos representativos de cada localidad para establecer la distancia entre los diferentes puntos geográficos, con el fin de construir una red de puntos y proceder a utilizar el algoritmo de árbol de mínima expansión para definir la red de nodos que genere la menor distancia y pueda conectar todas las localidades, y realizar un análisis sobre la ruta de ciclorruta propuesta por el algoritmo.

Marco teórico

Redes

Las redes surgieron de diversas situaciones de la vida real, por ejemplo, el transporte, las comunicaciones, la electricidad y en la actualidad las redes sociales. La investigación de operaciones se ha dedicado en los últimos años al diseño de modelos de optimización de redes, y entre los tipos de problemas más relevantes se encuentran el árbol de mínima expansión, la ruta más corta y el flujo máximo [18].

La modelación de redes permite resolver múltiples problemas de programación matemática mediante la implementación de algoritmos especiales creados para tal fin, conocidos como algoritmos de optimización de redes, los principales son: Árbol de mínima expansión, Ruta más corta y Flujo máximo.

Una red consiste en una serie de nodos enlazados con arcos (o ramas). La notación para describir una red es (N, A) , donde N es el conjunto de nodos y A , el conjunto de arcos [4].

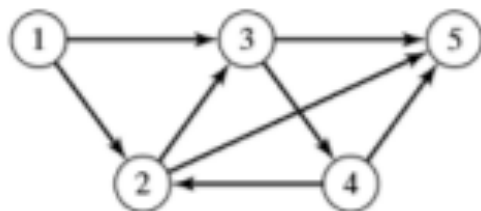


Figura 2. Ejemplo de una red (N, A) .

Fuente: tomado de [4].

Árbol de mínima expansión: Con este algoritmo se busca determinar una trayectoria a través de la red que conecte todos los nodos de forma que se minimice la distancia [4].

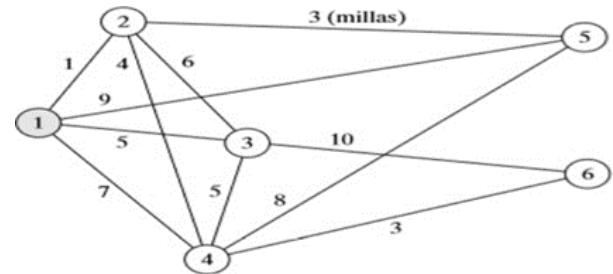


Figura 3. Ejemplo de un árbol de mínima expansión.

Fuente: tomado de [4].

El árbol de mínima expansión (MST, por sus siglas en inglés) fue formulado por primera vez en 1926 por Boruvka para la electrificación de la región de Moravia, con lo cual logró una reducción de costos en la distribución de energía [5]. Los algoritmos se componen de los siguientes pasos:

1. Diseñar una red que conecte todos los posibles nodos.
2. Seleccionar cualquier nodo de la red.
3. Conectar este nodo al nodo más cercano que disminuya la distancia.
4. Buscar el nodo más cercano que no esté conectado. Si hay empate para el nodo más cercano, seleccione cualquiera. Un empate permite una solución óptima múltiple.
5. Repetir el cuarto paso hasta conectar todos los nodos. [4]

La aplicación de los árboles de mínima expansión se puede observar también en el diseño de redes de acueductos, por ejemplo, en la red de servicio de acueducto de la ciudad de San Luis Rio Colorado [6].

Técnica de la ruta más corta: En este método se define la trayectoria más corta a través de una red. Entre los algoritmos relevantes para la puesta en ejecución de la técnica, está el método de la fuerza bruta y el algoritmo de Dijkstra [4]

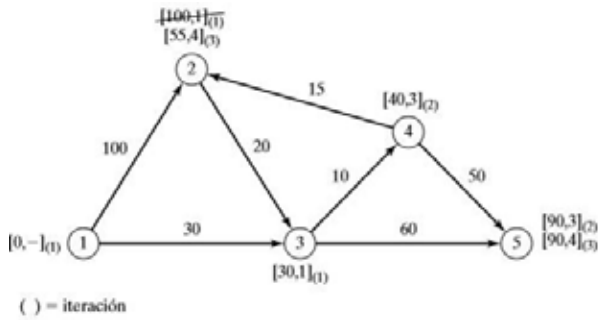


Figura 4. Ejemplo de la red aplicada al algoritmo de Dijkstra.

Fuente: tomado de [4].

El algoritmo de la ruta más corta consiste en analizar toda la red a partir de un origen y un destino, y se busca la ruta más corta entre los diferentes nodos de forma sucesiva y ascendente hasta llegar al nodo destino, donde se puede dar por resuelto el problema [7].

Técnica del flujo máximo: Por medio de este método, se puede hallar el flujo o cantidad máxima de objetos que pueden pasar a través de una red (Figura 5) [4].

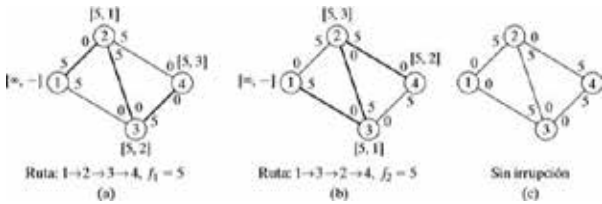


Figura 5. Ejemplo del flujo máximo.

Fuente: tomado de [4].

La técnica del flujo máximo se utiliza la mayoría de las veces en redes dirigidas, o sea en una sola dirección, por tanto, debe tener en cuenta un origen y un destino, los demás nodos se consideran de transbordo. El problema de flujo máximo se utiliza para maximizar el flujo de una red de distribución, el flujo de vehículos por una red vial, el flujo de agua en una red de acueductos, etc. [7].

Antecedentes

Parabuscartabajosdeinvestigaciónquecontengan información relacionada con la optimización de redes aplicadas al diseño de ciclovías o ciclorrutas, se hizo una revisión bibliográfica con base en las siguientes ecuaciones de búsqueda:

Optimización de redes and ciclorrutas and Latinoamérica (1)

Problemas de redes and ciclorrutas and Investigación de operaciones (2)

La mayoría de las investigaciones en la base de datos de Google Scholar fueron llevadas a cabo en Brasil y Perú. Entre los documentos de investigación encontrados con relación al diseño de ciclovías, algunos hacen referencia a su diseño geométrico. de estas cabe resaltar el trabajo de Guevara y Rodríguez [8], en el cual se busca diseñar una ciclovía en la ciudad de Lima a partir de la optimización de flujo de redes utilizando el algoritmo de Floyd-Marschall.

Otro trabajo interesante es el de Tejada et al. [9], quienes utilizan la microsimulación por medio del software Synchro 8.0, el cual genera una propuesta para el mejoramiento de la movilidad urbana en el entorno de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa.

Ordínez y Barry [10] presentan un modelo para definir el tránsito del ciclista, aplicado a la ciudad de Puerto Madryn en Argentina. El modelo se orienta a los trayectos más adecuados teniendo en cuenta, para los trayectos realizados, parámetros como la longitud, la frecuencia y el peso.

Metodología

Para el desarrollo de la metodología se tuvieron en cuenta los pasos propuestos para el algoritmo de árbol de mínima expansión mencionados más arriba. Inicialmente, se establecieron puntos referentes para 17 de las 18 localidades de la ciudad de Bogotá (ver Tabla 1) y sus ubicaciones correspondientes (Figura 5).

Tabla 1. Puntos referentes por localidad de la ciudad de Bogotá.

Puntos referentes por localidad					
N.º	Localidad	Punto referente	N.º	Localidad	Punto referente
1	Bosa	P. Central Bosa	10	Engativá	Unicentro Occidente
2	Usme	Portal Usme	11	Ciudad Bolívar	Facultad Tecnológica U. D.
3	R. Uribe	H. San Carlos	12	Antonio Nariño	P. Mercado Restrepo
4	Teusaquillo	C. C. Galerías	13	Mártires	P. Los Mártires
5	P. Aranda	B. Caldas	14	Fontibón	Zona Franca
6	San Cristóbal	Iglesia 20 de Julio	15	Candelaria	P. de Bolívar
7	Santa Fe	P. Nieves	16	Chapinero	P. Lourdes
8	Usaquén	Portal Norte	17	Tunjuelito	Parque Tunal
9	Suba	Portal Suba	18	Kennedy	Portal Américas

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5 se observan las ubicaciones referentes por localidad de la ciudad de Bogotá, según la Tabla 1.

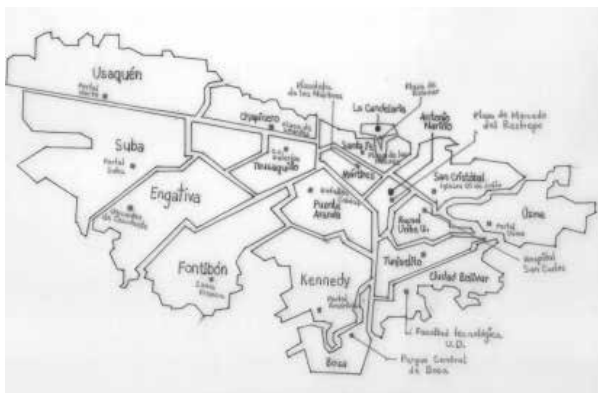


Figura 5. Puntos referentes por cada localidad de la ciudad de Bogotá.

Fuente: elaboración propia.

Luego, se calcularon las distancias entre puntos empleando todas las conexiones posibles con ayuda de la plataforma Google Maps, y se seleccionó la opción "A pie" para obtener resultados de las rutas más cortas. Hay que tener en cuenta que para algunas uniones de puntos no se les calculó la distancia por ser ubicaciones bastante alejadas, como ocurre entre "Portal Norte" y "Portal Usme", de esta manera, se quiere determinar una red de ciclorruta que incluya las rutas más cortas. A continuación, se muestran los resultados, entendiendo que el cálculo de la distancia desde "Portal Norte" hasta "Plaza Lourdes", será el mismo si es desde "Plaza Lourdes" hasta "Portal Norte".

Tabla 2. Distancias del origen "Portal Norte".

Origen	Destinos	Distancia (km)
Portal Norte	Plaza de Lourdes	13,10
	C. C. Galerías	14,60
	Portal Suba	8,00
	Unicentro de Occidente	12,20

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Distancias del origen "Parque central de Bosa".

Origen	Destino	Distancia (km)
Parque de Bosa	Facultad Tecnológica U. D.	5,40
	Parque Tunal	8,90
	Portal Usme	13,70
	Plaza Mercado Restrepo	11,30
	Iglesia 20 de Julio	12,90

Fuente: elaboración propia

A partir de las distancias anteriormente calculadas, se obtuvo la red que se observa en la Figura 6.

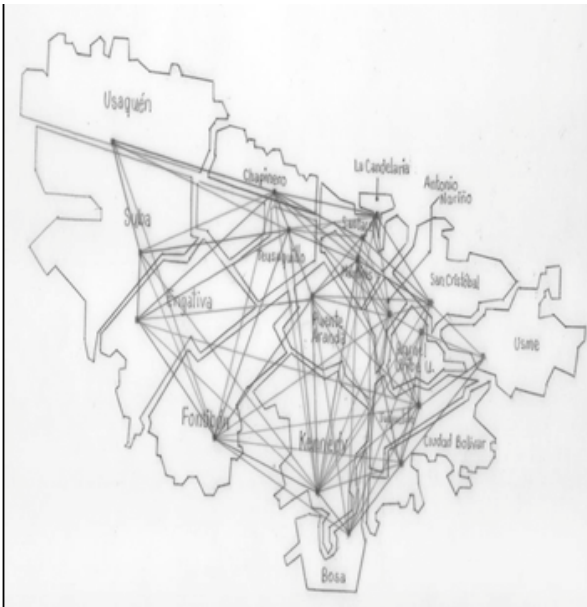


Figura 6. Red para los puntos referentes para cada localidad de la ciudad de Bogotá.
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se obtuvo la ruta óptima tomando como nodo inicial el Portal del Norte y se conectaron los nodos teniendo en cuenta la técnica del árbol de mínima expansión.

Resultados

Como se puede observar, la ruta que se trazó comienza en el Portal Norte, pasa por el Portal de Suba, Unicentro de Occidente, llega a la Zona Franca, donde la ruta más corta desde este punto es el Portal de las Américas en Kennedy, es decir en el sur, seguidamente, la ruta pasa por las localidades ubicadas en el sur de la ciudad, hasta llegar nuevamente al norte en Chapinero (Plaza de Lourdes). Esto demuestra que esta ruta no es completamente óptima y que el método utilizado para calcularla no es el más efectivo: por ejemplo, si se desea ir de Unicentro de Occidente a la Plaza de Lourdes, la ruta sugiere recorrer la ciudad por los diferentes puntos referentes del sector sur y el centro, cuando se podría utilizar una ruta más directa entre los nodos anteriormente nombrados; otro ejemplo es el recorrido desde el Portal Américas hasta Puente Aranda o Batallón Caldas, puesto que, a pesar de

ser una ruta extensa (10,60 km), es más óptimo que trasladarse por las demás localidades del sur como se plantea en la Figura 6; además, esta zona en particular presenta una gran demanda de bicisuarios que usualmente desean dirigirse por esta ruta para llegar a las zonas del Centro y Chapinero, por eso es importante tener en cuenta la conexión entre Kennedy y Puente Aranda a la hora de diseñar una red de ciclorruta.

Por otro lado, el nodo "Portal Tunal" tiene tres conexiones, porque el Portal Usme queda "por fuera" de la red y tuvo que unirse con este punto que era el más cercano. De acuerdo con lo anterior, se diseñó otra ruta, iniciando esta vez en la "Iglesia 20 de Julio", para poder realizar una comparación y determinar cuál de las dos opciones sería la ruta más coherente o correcta. La ruta se muestra en la Figura 7.

La distancia total para esta ruta es de 81,30 km. Teniendo en cuenta esta nueva ruta, se construye el trayecto que debe realizar el bicisuario, trasladándose por los puntos geográficos que se relacionan en la Tabla 4.

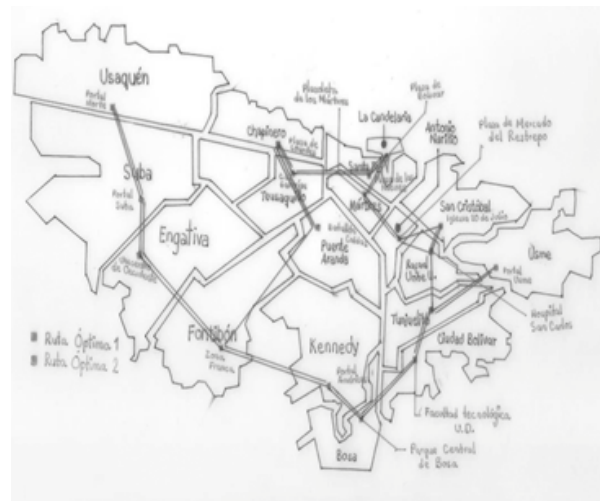


Figura 7. Ruta óptima N.º 02, iniciando en la Iglesia 20 de Julio.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Trayecto a realizar según la ruta óptima N.º 02 obtenida.

N.º de arco	Origen	Destino
1	Iglesia 20 de Julio	Hospital San Carlos
2	Hospital San Carlos	Plaza de Mercado del Restrepo
3	Plaza de Mercado del Restrepo	Plazoleta de los Mártires
4	Plazoleta de los Mártires	Plaza de Bolívar
5	Plaza de Bolívar	Plaza de las Nieves
6	Plaza de las Nieves	C. C. Galerías
7	C. C. Galerías	Plaza de Lourdes
8	Plaza de Lourdes	Batallón Caldas
9	Batallón Caldas	Zona Franca
10	Zona Franca	Portal Américas
11	Portal Américas	Parque Central de Bosa
12	Parque Central de Bosa	Facultad Tecnológica U. D.
13	Facultad Tecnológica U. D.	Parque El Tunal
14	Parque El Tunal	Portal Usme
15	Zona Franca	Unicentro de Occidente
16	Unicentro de Occidente	Portal Suba
17	Portal Suba	Portal Norte

Fuente: elaboración propia.

Como se pudo observar, esta nueva ruta empieza en la Iglesia 20 de Julio y recorre seguidamente la Plaza de Mercado del Restrepo, la Plazoleta de los Mártires, la Plaza de Bolívar, la Plaza de las Nieves, el C. C. Galerías, la Plaza de Lourdes y el Batallón Caldas, y luego, en este nodo, se conecta con La Zona Franca, donde se tienen dos opciones: la ruta más corta es ir hacia el Portal Américas donde el último nodo a través de esta opción es el Portal Usme; el otro vínculo es con Unicentro de Occidente, pasando por el Portal Suba y finalizando el recorrido en el Portal Norte. El nodo de Zona Franca tiene tres conexiones, las cuales permiten tener vínculos organizados e importantes que representan la unión con el norte, con el centro y con el sur de la ciudad.

En comparación con la ruta óptima N.º 01, esta nueva ruta abarca una mayor distancia, pero se evidencia que su cobertura comprende también la conexión entre Portal Américas y Puente Aranda, situación que no sucede en la primera propuesta, y adicionalmente, citando el ejemplo que se dio en la conclusión de la ruta óptima N.º 01, si se desea ir de Unicentro de Occidente a la Plaza de Lourdes, esta ruta sugiere un camino directo sin la necesidad de recorrer toda la ciudad. Con base en lo expuesto, se podría concluir que la red de ciclorruta propuesta podría ser más efectiva con respecto al primer resultado obtenido. Sin embargo, por el método del árbol de la Mínima Expansión no arroja una ruta totalmente óptima, porque para la ruta N.º 02, iniciando en la Iglesia 20 de Julio, si se quiere ir del Portal Norte a la Plaza de Lourdes, la ruta sugiere para poder llegar ir primero hacia el Portal Suba, Unicentro de Occidente, Zona Franca, pasar por la localidad de Puente Aranda y Teusaquillo, lo cual hace que la distancia sea mucho más extensa pudiendo hacer un recorrido más directo; este caso ocurre con otras conexiones entre nodos, por ejemplo: la Plazoleta de los Mártires y Batallón Caldas, Kennedy y Plaza de Mercado del Restrepo.

Conclusiones

Mediante el empleo de la técnica de árbol de mínima distancia o expansión, se define una ciclorruta con capacidad de conectar todas las localidades de Bogotá a una mínima distancia de 77 km.

La ruta que determina la utilización de la técnica de árbol de mínima expansión es de tipo circunvalar, lo cual puede dificultar la comunicación con puntos geográficos del interior de la ciudad.

Por medio de la utilización del árbol de mínima expansión se podría realizar una planificación de forma ordenada y a menor costo de las ciclorrutas, teniendo una ruta principal y unas rutas secundarias.

Esta metodología se puede desarrollar en municipios que en la actualidad no cuenten

con red de ciclorrutas para planificar de forma adecuada estos tipos de proyectos y se generen menos costos por construcción y conexión.

De acuerdo con los nodos propuestos, esta misma metodología se puede establecer al interior de las localidades de Bogotá D. C., con el fin de conectar estos nodos principales con nodos secundarios y con ello formar una red de ciclorrutas secundarias dentro de las localidades.

El diseño de la red de ciclorruta no solo utilizó el algoritmo del árbol de mínima expansión, también tuvo en cuenta el principio de la ruta más corta para determinar la distancia mínima entre los diferentes nodos geográficos de las diferentes localidades de la ciudad, la cual se determinó por medio de aplicaciones como Google Maps y Moovit.

Trabajos futuros

Se espera profundizar en la investigación aplicando la metodología del árbol de mínima expansión para municipios que en la actualidad no tengan red de ciclorrutas, con el fin de definir una propuesta para socializarla con alcaldías y secretarías de planeación.

Con base en el algoritmo de árbol de mínima expansión y ruta más corta se pretende crear una aplicación de programación que permita diseñar rutas basadas en los algoritmos anteriormente mencionados.

Referencias

- [1] "Bogotá alcanza los 80 kilómetros de ciclovías temporales", [En línea]. Instituto Distrital de Recreación y Deporte", 2020. Disponible en: <https://www.idrd.gov.co/noticias/bogota-alcanza-los-80-kilometros-ciclovias-temporales> [Acceso: 12 de julio de 2021].
- [2] "Movilidad Uniandes", *Manual de Movilidad. Universidad de los Andes*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://movilidad.uniandes.edu.co/index.php/bici> [Acceso: 12 de julio de 2021].

- [3] M. Adarme, D. Heredia, E. Puerto Cuadros, "Detección de modos de transporte usando datos GPS", *Revista Cuaderno Activa*, n.º 9, pp. 13-29, 2017.
- [4] H. Taha y V. González Pozo, *Investigación de operaciones*. México: Pearson Educación, 2004.
- [5] H. Mayta, "Algoritmo evolutivo para el problema de árbol de expansión mínima (MST)", *Revista Industrial Data*, vol. 5, n.º 2, pp. 64-67, 2002.
- [6] G. Tzatchkov y V. Alcocer, "Implementación de algoritmos basados en la teoría de grafos en proyectos de sectorización de redes de agua potable", *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 2, n.º 3, pp. 97-114, 2011.
- [7] F. Hillier y G. Lieberman, *Fundamentos de la Investigación de operaciones*, México: Pearson Educación, 2014.
- [8] R. Guevara y M. Rodríguez, "Propuesta de diseño de ciclovías en Lima metropolitana mediante la optimización de flujo de redes", 2018, Congreso Latinoamericano-Iberoamericano de Investigación de operaciones CLAIO XIX.
- [9] J. Tejada, L. Villalba, L. Huaco y P. Gonzales, "Modelo de optimización del tráfico y mejora de la movilidad urbana en el entorno de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa", *Revista Veritas Journal*, vol. 15, n.º 1, pp. 67-79, 2017.
- [10] L. Ordinez y D. Barry, "Modelo de análisis para el dominio de tránsito Ciclista", *XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación CACIC*, 2017, pp. 1010-1019. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/63863>.

López, Sebastián y Álvarez, Carlos (2021). Disposición de residuos sólidos plásticos en la zona del ROPME. Una problemática latente, Colombia. Cuaderno Activa, 13, 11-23.



Disposición de residuos sólidos plásticos en la zona del ROPME. Una problemática latente

Disposal of solid plastic waste in the ROPME area. A latent problem

Sebastián López Botero, Ing. Carlos Augusto Álvarez Arboleda

Recibido: 5 agosto 2020. **Aprobado:** 1 noviembre 2020.

Resumen. Una gran preocupación mundial es el impacto ambiental que causa la contaminación de residuos sólidos plásticos en las áreas marítimas. Esta cuestión ha sido ampliamente estudiada en los países aledaños a la Zona Marítima de la Organización Regional para la Protección del Medio Marino (ROPME), donde actualmente existe un amplio y rápido crecimiento demográfico y económico, lo cual ha ocasionado un considerable deterioro de los ecosistemas costeros. En este documento se describen generalidades de los residuos plásticos y sus características en el área del ROPME. Mediante la revisión bibliográfica, se analizan los impactos medioambientales al medio marino causados por los diferentes tipos de desechos según su tamaño y cómo se afecta la fauna y flora. Asimismo, se recomienda la implementación de planes de acción regionales y nacionales para abordar la amenaza

creciente de contaminación y fomentar la riqueza socioeconómica y ambiental de la zona marítima de estudio, con la participación de las partes interesadas y la utilización de la legislación reguladora.

Palabras clave: Desechos marinos, contaminación, residuos sólidos plásticos, ROPME.

Abstract. A major global concern is the environmental impact of plastic solid waste contamination in maritime areas. This issue has been extensively studied in countries surrounding the Maritime Zone of the Regional Organization for the Protection of the Marine Environment (ROPME) where there is now wide and rapid population and economic growth, resulting in a considerable deterioration of coastal ecosystems. This document describes generalities of plastic

1. Especialista en tratamiento, valoración y gestión de residuos sólidos. Tecnológico de Antioquia - I.U. Colombia, Medellín. Sebaslopezb@gmail.com.

2. Ingeniero sanitario, Ph.D, Tecnológico de Antioquia, I. U. – Grupo de investigación GITIMA. Colombia, Medellín, carlos.alvarez66@tdea.edu.co. ORCID: 0000-0003-4029-6072

waste in the ROPME area and characteristics of these wastes. The bibliographic review analyses the environmental impacts to the marine environment caused by different types of waste according to their size and how fauna and flora are affected. It also recommends the implementation of regional and national action plans to address the growing threat of pollution and promote the socio-economic and environmental prosperity of the maritime study area, with the participation of stakeholders and the use of regulatory legislation.

Keywords: Marine litter, pollution, solid plastic waste, ROPME.

Introducción

Según la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, la contaminación marítima se define como “la introducción por el hombre, directa o indirectamente, de sustancias o sólidos en el ambiente marino que resulta o es probable que produzca efectos nocivos y daño a los recursos de la vida marina” [1].

Los residuos antropogénicos que se depositan en el mar son un problema mundial y se ha discutido en la literatura científica por décadas. Al océano ingresan diversos tipos de contaminantes, como las aguas residuales, la escorrentía agrícola, las cargas de nitrógeno, desechos industriales, entre otros residuos. Sin embargo, la contaminación de residuos sólidos plásticos se ha convertido en una problemática ambiental generalizada y ha ganado considerable atención en los últimos años [2].

Asimismo, la eliminación de desechos plásticos y la amenaza que representa para el medio marino se está convirtiendo en un importante desafío ambiental en el Medio Oriente [3]. En esta revisión se considera el área marítima cubierta por la Organización Regional para la Protección del Medio Marino (ROPME), con el fin de reconocer la problemática del estado del entorno marino ante la disposición de residuos sólidos en esta área de interés específico, causada por diversos factores demográficos y socioeconómicos. Por lo tanto, es oportuno revisar el estado del arte respecto de los desechos arrojados en el área

de ROPME y considerar qué acciones se deben desarrollar a nivel nacional y regional para frenar su aporte y acumulación.

Teniendo en cuenta que la problemática en cuestión ha sido estudiada pero continúa latente [4], el objetivo de esta revisión fue examinar lo relacionado con el alto vertimiento de residuos sólidos plásticos en la zona del ROPME y sus implicaciones ambientales, para dar a conocer en países como el nuestro problemáticas que podrían llegar a presentarse en sus costas.

Para llevar a cabo este análisis, se hizo una revisión bibliográfica, seguida de un análisis e interpretación de la información disponible. La búsqueda se efectuó en diferentes fuentes como: Google académico, Web of Science, ScienceDirect, SciELO, Medigraphic, entre otros, mediante el uso de la biblioteca virtual, de las cuales se seleccionaron artículos e investigaciones relacionados con la contaminación por plásticos en zonas costeras en el sector del ROPME, teniendo en cuenta criterios como: agentes contaminantes, microplásticos, afectación a la fauna y flora marinas y planificación del marco de acción.

El texto se desarrolló de la siguiente forma: en la primera sección se detalla la generación de agentes plásticos contaminantes en la zona de estudio, sus causas y efectos; luego, con el análisis de la información recopilada, se presentan las diferentes afectaciones ambientales causadas por los residuos sólidos en los ecosistemas marinos. Por último, se presentan las conclusiones.

Metodología

La revisión del estado del arte sobre la alta disposición de residuos sólidos plásticos en la zona del ROPME, que es una problemática latente en la actualidad, se enfoca en examinar casos de estudios relacionados con la generación de sólidos en la zona y sus implicaciones ambientales, según la naturaleza del contaminante.

Búsqueda e identificación de artículos

Para la búsqueda bibliográfica se utilizaron las palabras claves *contaminación de plásticos* y *ROPME*. Toda la información encontrada

corresponde a artículos publicados en revistas electrónicas, algunos son revisiones, otros son investigaciones académicas y experimentales; también se encontraron algunas noticias y artículos divulgativos.

Clasificación de la información

De más de 550 artículos que hacen parte del conjunto de referencias consultadas, después de leer los resúmenes de cada una de ellas, se preseleccionaron 110 que contenían algún tipo de información sobre efectos ambientales de la contaminación por sólidos en el medio marino y otros específicamente en el área del ROPME; de estas referencias, 90 están publicadas en 10 revistas científicas, y dentro de este subgrupo se seleccionaron 83 que contenían información relevante para efectos del presente artículo. Para complementar el análisis, se incluyeron en la revisión referencias que pertenecen a páginas web oficiales de noticieros y de oficinas gubernamentales, las cuales brindan información que permite contextualizar la temática en el contexto regional y local.

Análisis de la información

Los 83 documentos seleccionados fueron catalogados en una matriz de información por orden cronológico y temático que incluye las diferentes categorías relacionadas con el sector de influencia en la industria: 1) impactos medioambientales; 2) generación de residuos plásticos; 3) Microplásticos; 4) generalidades de la zona de estudio; 5) afectaciones ambientales, y 6) elaboración de plan de acción. Esta matriz incluye un resumen de cada estudio y representa el punto de partida para la revisión de estado del arte presentado en el presente artículo.

Generalidades

Residuos sólidos plásticos

Los residuos sólidos son aquellos materiales, productos o sustancias provenientes de la actividad humana o la naturaleza, que una vez han cumplido su propósito son destinados al abandono dado a que se vuelven inaprovechables [5], [6], [7].

Ahora bien, los residuos sólidos plásticos son aquellos de naturaleza inorgánica cuya composición es de base polimérica. Los plásticos se componen típicamente de polímeros sintéticos y aditivos químicos utilizados para mejorar sus propiedades y adaptar su aplicación, de acuerdo con el uso que se les dé [8]. Estos aditivos incluyen compuestos plastificantes, colorantes y agentes soplantes. Los plásticos también pueden contener sales de iones metálicos o metálicos en forma de hierro, manganeso y cobalto [9]. Existen dos grandes tipos de plásticos:

- Los termoplásticos: que no sufren cambios en su estructura química durante el calentamiento. Se pueden calentar y volver a moldear cuantas veces se desee. Por ejemplo, el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el poliestireno expandido (EPS), el policloruro de vinilo (PVC), el politereftalato de etilenglicol (PET), etc.
- Los termoestables: que sufren un cambio químico cuando se moldean y, una vez transformados por la acción del calor, no pueden ya modificar su forma. Por ejemplo, las resinas epoxídicas, las resinas fenólicas y amídicas y los poliuretanos.

Plásticos en el medio marino

Alrededor del 9 % de todos los plásticos fabricados en el mundo son reciclados y aproximadamente 275 millones de toneladas de residuos sólidos plásticos (PSW, por sus siglas en inglés) se generan anualmente [10], [11]. Por su costo, durabilidad, maleabilidad y resistencia a la degradación, el plástico como materia prima ha resultado ser un producto de múltiples ventajas en comparación con otros materiales, ya que es ligero, esquemáticamente estable y no corrosible (no biodegradable); a causa de esto, los residuos plásticos depositados en vertederos pueden demorar años para degradarse completamente. Al descomponerse, los plásticos filtran productos químicos al suelo y al océano. Una vez se encuentran en el océano, estos residuos se descomponen rápidamente, y durante este proceso liberan químicos de alta toxicidad, peligrosos para la vida de los ecosistemas marinos y la vida humana [12], [13], [14].

Generación de agentes contaminantes en la zona de estudio y sus características

La zona de interés del presente estudio es conocida como ROPME. Se trata de la convención regional de mares establecida por Bahrein, Irán, Irak, Kuwait, Omán, Qatar, Arabia Saudita y los Emiratos Árabes Unidos (EAU). Los países que bordean el área marítima de ROPME (Figura 1) viven un rápido crecimiento demográfico y económico [15].



Figura 1. Señalización de zona marítima de estudio.

Fuente: Tomado de [3]

Crecimiento de la contaminación de residuos en los países que rodean la zona de ROPME

La alta tasa de crecimiento de la población y el consecuente desarrollo económico en el Medio Oriente han acelerado la generación de residuos dado el alto consumo de la población. La generación bruta de residuos urbanos en los países del Medio Oriente ya supera los 150 millones de toneladas por año, resultado del alto nivel de vida, la falta de conciencia sobre prácticas de gestión de residuos, y la gran huella de carbono per cápita que caracteriza a la región al ser dependiente de los recursos energéticos [16].

En los países más prósperos del Consejo de Cooperación del Golfo (CCG), los desechos sólidos municipales se componen en su mayor parte de desechos orgánicos (hasta en un 60 %), pero también están compuestos hasta en un 21 % de artículos a base de plástico [4], [12], [17], [18]. Esta situación es consecuencia de la alta producción local de plásticos, se estima que el CCG ha tenido un aumento en la producción del 11 % anual,

llegando a producir 27,1 millones de toneladas hasta el 2016 [18]. Qatar, por ejemplo, durante la década pasada, se convirtió en uno de los mayores productores de polímeros en la región, por lo que la industria de plástico tiene una gran participación económica en este estado [12].

La tendencia de la generación de residuos plásticos en la región del CCG continúa ascendiendo. Para 2016, ya había alcanzado una capacidad de fabricación de 2,5 millones de toneladas de plásticos, en la que los polímeros de ingeniería constituyeron el 70 % de la participación del mercado. A la aplicación de los plásticos producidos contribuyen actividades de alto desarrollo como la construcción, el transporte, la electrónica y la atención médica [19].

Como menciona Gómez [5], el acelerado crecimiento de las ciudades, la concentración de la población y el aumento de la calidad de vida conllevan la producción de toneladas de residuos. En otras palabras, una mayor demanda supone un mayor consumo, sobre todo de aquellos productos hechos para un solo uso [4].

Un claro ejemplo de la demanda de productos plásticos de un solo uso está en el vertiginoso ascenso del consumo de agua embotellada. Los Emiratos Árabes, Kuwait y Arabia Saudita se encuentran entre el 10 % de los mayores consumidores a nivel mundial de agua embotellada per cápita. Se estima que el residente promedio de Emiratos Árabes usa 450 botellas de plástico al año, lo cual los deja en el cuarto nivel más alto de consumo de agua embotellada en el mundo [20]. También es preocupante el creciente y desmedido uso de bolsas plásticas de un solo uso en la región [4]; solamente en los Emiratos Árabes se usaban 11 mil millones de bolsas plásticas al año, a lo se suma un desperdicio anual de 912,5 kilogramos per cápita [21].

En toda la región del CCG, las tasas de reciclaje se encuentran por debajo del 10 %, muy por debajo de la UE, donde las tasas de reciclaje superan el 40 %. Dentro del Área Marina de ROPME, poco se conoce acerca de la distribución y composición de la basura acumulada en el medio marino, con solo

un número limitado de informes revisados [12], [18], [22], [23].

El residuo marino plástico es visto como un problema global, especialmente por el crédito dado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [24]. El ODS 14, 'Conservar y utilizar de manera sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible' [25], proporciona un enfoque para la acción continua necesaria para reducir la contaminación plástica marina. Este ODS defiende que la solución a la basura marina se puede encontrar haciendo la transición a medios de producción y consumo más sostenibles [24].

En la Figura 2 se observan los tiempos promedio que se requieren para que un desecho sólido se descomponga, según su naturaleza.

Procesos y efectos ambientales

Los residuos plásticos se han esparcido ampliamente por todo el planeta y ocasionan graves problemas a los organismos vivos y al medio ambiente en diferentes aspectos. Estos plásticos tradicionales se derivan de materias primas fósiles, y por su naturaleza son difíciles de degradar, por lo que se consideran como los sólidos de mayor proporción de contaminación en el mundo [26].

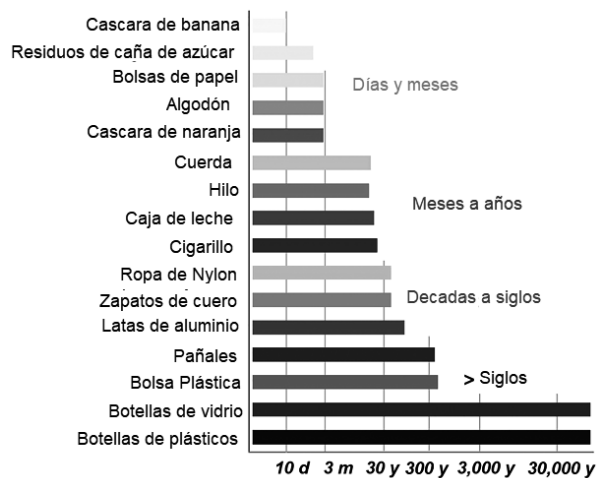


Figura 2. Período promedio de descomposición de ciertos desechos.

Fuente: Adaptado de [26], al español.

Caracterización de la basura marina en la zona del ROPME

A continuación, se procede a describir los residuos sólidos plásticos hallados en la zona del ROPME en la documentación examinada:

En 1980 se realizó una inspección en doce playas de la costa noroccidental del Golfo Árabe de Kuwait, en ellas se encontró la presencia de partículas de plástico, bolas de alquitrán y grumos de alquitrán; la mayor parte de dichas partículas estaban compuestas de polietileno de baja densidad, polipropileno y poliestireno de alta densidad. La presencia de estas partículas se debía a 33 fábricas de plásticos que operaban cerca a las costas en la época, las partículas eran transportadas por los fuertes vientos y la acción de las olas [27].

Más tarde se investigó la composición y distribución de basura acumulada en 27.000 m² de las playas occidentales y orientales del Golfo Árabe y el Golfo de Omán, en los Emiratos Árabes. Se estimó que 13,5 millones de residuos estaban varados a lo largo de 800 km de las costas de ambos golfos, los cuales se componían en un 27,1 % de fragmentos de plástico. Los artículos de plástico encontrados fueron *pellets*, botellas, flotadores y redes de pesca [28].

Además, estos estudios pusieron en evidencia la contaminación generalizada por *pellets* plásticos (fragmentos granulares de material aglomerado) alrededor de las costas de los Emiratos Árabes, con la presencia de entre 1.000 y 60.000 *pellets* por cada metro cuadrado de costa. En cambio, en las costas de Omán los *pellets* se encontraban en menor medida, aproximadamente entre 50 y 200 por cada metro cuadrado [28].

En 2004, se describieron la abundancia y el peso de los desechos encontrados en 11 playas del Golfo de Omán. A pesar de haber reportado una densidad relativamente menor por basura en comparación con otros estudios mundiales, el estudio reveló que los desechos encontrados eran en su mayoría plásticos, los desechos industriales representaban menos del 10 % y, en términos de peso, los residuos provenientes de la pesca

representaban la mayor proporción. La mayoría de los desechos eran de origen local, provenientes de actividades turísticas en la playa [29].

Continuando con las playas, se realizó un estudio en 11 de estas en trayectos de 100 m al oeste de Mascate, Irán. Los resultados pusieron en evidencia que los desechos más comunes eran aquellos a base de plástico y poliestireno. Más del 90 % de los residuos encontrados en las playas estudiadas provenían de actividades de recreación (gorras, tapas, botellas, paquetes de confiterías, etc.) [30]. Los filtros de cigarrillos son uno de los desechos más comunes en las playas. Estos están compuestos de un plástico denominado acetato de celulosa, y por lo general se encuentran contaminados por nicotina, metales pesados y otros químicos que llegan a absorber. Además de estar compuestos de materiales plásticos, los filtros tardan años en degradarse, y mientras, en ese proceso, se convierten en ínfimas partículas de plástico conocidas como “microplásticos”. Los microplásticos son nocivos para la vida marina [31]. Respecto a la presencia de colillas de cigarrillo en los ambientes marítimos de ROPME, un estudio realizado a lo largo del Golfo Pérsico demostró que los metales tóxicos notables de Hg y Pb ingresan al ambiente marítimo cada año, para luego introducirse en los organismos y, posteriormente, ingresar a la cadena alimentaria y al cuerpo humano [32]. En otro estudio también se encontró que metales como Cd, Fe, As, Ni, Cu, Zn y Mn pueden ingresar al medio marino cada año solamente a partir de la basura de colillas de cigarrillos [33].

Un estudio llevado a cabo en 2019 en los manglares del Mar Rojo de Arabia Saudita evidenció que los neumatóforos (bosques de manglares) actúan como un tamiz que retiene grandes objetos, de los cuales el 95 % eran residuos plásticos compuestos por cuerdas, bolsas, recipientes y empaques de alimentos y botellas de bebidas. Asimismo, los resultados sugieren que las actividades oceánicas combinadas con las corrientes superficiales actúan como impulsores de la basura marina en la cuenca [34].

- **Macroplásticos:** En relación con su tamaño, los plásticos en el medio marino podrían estar presentes tanto en macro como en microformas. Según una estimación de las Naciones Unidas en 2018, anualmente 13 millones de toneladas de plástico son introducidas en el océano, situación que pone en riesgo los ecosistemas marinos y provoca lesiones y daños físicos en aves marinas, mamíferos y tortugas [4], [35].

La contaminación marina con plásticos ha recibido atención significativa por parte de la comunidad científica e incluso por la opinión pública. Los residuos plásticos más grandes, denominados “macroplásticos”, han sido investigados con anterioridad, dado que son ingeridos por las especies marinas, otros son transportados a otros hábitats al adherirse a residuos flotantes y por el bloqueo del intercambio de gases en el fondo marino cuando los residuos se hunden. No obstante, durante los últimos años han tomado relevancia los efectos de los microplásticos en las dinámicas de los ecosistemas y en la biota marina [36].

- **Microplásticos:** Los microplásticos son contaminantes emergentes, es decir, son fragmentos de un pequeño tamaño que se encuentran vertidos en las aguas y solo han sido delimitados gracias a la alta sensibilidad de las tecnologías modernas. Los microplásticos suelen tener diámetro menor a 5 mm [37], [38], y pueden ser: (1) microplásticos visibles, con diámetro entre 1 hasta 5 mm; (2) nanoplásticos, los cuales tienen diámetros menores a 0,001 mm [39], [40].

De acuerdo con su origen pueden ser clasificados como microplásticos primarios o secundarios. Los microplásticos primarios se fabrican de tamaños microscópicos [41]. Estos comprenden *pellets* de resina de producción, microperlas para abrasivos en cosméticos, polvos para administración de fármacos, entre otros [42]. En cambio, los microplásticos secundarios provienen de la degradación de los plásticos más grandes por medio de fragmentación fotolítica (radiación UV), fragmentación mecánica y degradación biológica [36], [43].

Por otro lado, la continua degradación fotolítica produce microplásticos mucho más pequeños, denominados nanoplásticos, no obstante, este proceso provoca que los aditivos químicos del plástico se desprendan [36]. Algunas técnicas, como las fluorescentes de microscopía, se utilizan típicamente para aislar microplásticos de otros tipos [44].

Según la literatura, los microplásticos pueden transportar diversos compuestos químicos, como: (1) aditivos, que incluyen ftalatos, bisfenol A, retardantes de llama, antimicrobianos y nonilfenoles; (2) metales pesados, y (3) contaminantes orgánicos hidrófobos que absorben zinc, plomo, bifenilos, policlorados, hidrocarburos aromáticos, policíclicos, etc. [33], [41], [44], [45], [46], [47].

Bioplásticos: Los bioplásticos son fabricados casi en su totalidad a base de recursos biológicos renovables. Por ejemplo, el polietileno es hecho a partir del etileno, el cual proviene del procesamiento de la caña de azúcar, mientras que el ácido poliláctico (PLA) es hecho a partir del ácido láctico derivado del almidón. Sus propiedades y aplicaciones dependen del recurso del que provienen, además pueden ser biodegradables.

Los bioplásticos son de base biológica (derivado de la biomasa, o plantas), biodegradables o ambos [48], [49]. Son utilizados para la fabricación de envases y en el sector textil se emplean en forma de fibras, también para hacer calzado deportivo y son aplicados en el sector agricultor [48].

La degradación de los bioplásticos se da al descomponerse de forma completa en dióxido de carbono (CO₂) y agua con residuos insignificantes. El período de degradación de los bioplásticos biodegradables puede ser de días a meses, además, varía según los materiales que los componen y las condiciones ambientales del entorno [50].

Para Rojo y Montoto [51], los bioplásticos parecen una opción ideal para con el medioambiente, sin embargo, su uso como sustitutos de los plásticos comunes no enfrenta por sí solo el problema asociado a estos recursos. Los autores consideran que se deben implementar en conjunto con un modelo de uso

y de gestión de plásticos. Además, exponen que su biodegradabilidad en ambientes marinos es dudosa y poco eficiente.

Afectación a la fauna y la flora marinas

La presencia de basuras y macroplásticos en los ambientes marinos tiene efectos adversos en la vida de los organismos que habitan en ellos. Los estudios muestran que estos elementos suelen ser ingeridos por los animales, causar lesiones físicas, atrapar, sofocar y provocar malformaciones [35], [51].

Los denominados atrapamientos o enmallamientos son ocasionados por implementos de pesca abandonados o perdidos en el mar (los cuales actualmente se fabrican con materiales plásticos) [52], [53], [54]. Este efecto es conocido comúnmente como "pesca fantasma", y también es provocado por bolsas de plástico o los packs plásticos de latas [51]. Por otro lado, en un estudio experimental se utilizaron trampas desplegadas para simular equipos de pesca perdidos, y se descubrió que podrían atrapar 1,34 kg/trampa por día [4].

De acuerdo con la evidencia, se estima que en la zona del ROPME, más precisamente en el Mar de Omán, se han hallado muertas tortugas de cuero (*Dermochelys coriacea*) a causa de equipos de pesca [55]. Asimismo, cerca del 52 % de los atrapamientos de las tortugas de Abu Dhabi están relacionados con redes ilegales y/o abandonadas [56].

La presencia de los microplásticos en el entorno marino puede afectar a los seres vivos según su tamaño. Los microplásticos con diámetros entre 1 y 5 mm tienen más impacto en la alimentación y digestión de ciertos organismos. Los microplásticos más pequeños (con diámetros de micras) son ingeridos y excretados por pequeños invertebrados, como organismos planctónicos [57], [51]. Se tiene evidencia de que los nanoplásticos pueden permear las membranas celulares de los organismos y afectar sus funciones fisiológicas, y en otros casos pueden residir en sus tejidos epiteliales durante períodos prolongados [58], [59], [60], [61]. De igual modo, los microplásticos, al ser ingeridos por organismos pequeños y al estar presentes en

la superficie del agua, pueden ser transferidos a lo largo de toda la cadena trófica [62], [63], y al entrar en el tracto digestivo de organismos más grandes, pueden provocar trastornos en su alimentación, digestión y reproducción, dado que llegan a obstruir los apéndices por los que obtienen alimento o también el tracto intestinal. Lo anterior conlleva efectos nocivos en los animales a causa de la desnutrición, ya que gran parte de sus alimentos son reemplazados por estos residuos [41], [64], [65], [66]. En el caso de los cangrejos, por ejemplo, ingieren los microplásticos de forma oral y también pueden entrar a su sistema circulatorio a través de las branquias [67].

Gestión de la contaminación costera

El principal reto para la mitigación del impacto ambiental que ocasiona la basura marina es lograr reducir las fuentes terrestres y marítimas que la generan, mejorando la gestión de residuos y la práctica de los principios 4 R (Reducir, Reutilizar, Reciclar y Rediseñar) para evitar que entre en el medio marino [4]. Solucionar la crisis de la basura marina en el área del ROPME requiere un plan integrado y continuo con acciones a nivel local, regional y mundial. Es bien sabido que la generación de la basura marina, así como su prevención, están claramente vinculadas a ciertas actividades humanas y áreas políticas que operan tanto en el nivel nacional como internacional [68]. Además, las acciones para abordar la problemática deben orientarse a las prácticas y políticas de la zona [3], [69]. Por lo tanto, para abordar sus fuentes e impacto, son necesarios la legislación, los acuerdos y las acciones en múltiples sectores [4]. Esta gestión debe incluir iniciativas de reducción de basura enfocadas en el tratamiento de residuos sólidos y aguas residuales, asuntos transfronterizos, diseño de productos (a base de plásticos), deposición de residuos, políticas de pesca y patrones de comportamiento impulsados por los consumidores [3], [70], [71], [72].

Desde el 2018, la Unión Europea ha puesto en práctica una estrategia para el uso del plástico a partir de una economía circular, la cual se centra en el diseño y la producción de productos a base de plástico teniendo en cuenta el requisito

de reutilización, reparación, reciclaje y desarrollo y promoción de materiales más sostenibles [4]. Esto ha servido de ejemplo para otros países, los cuales han puesto en ejecución políticas propias de reducción de plásticos de un solo uso [73], [74], [75]. En el mundo, estos planes se han introducido en más de 60 países, y la aplicación de estas estrategias ha mostrado resultados exitosos, como la reducción de bolsas de plástico de un solo uso que oscila entre el 33 % y el 96 % [75], [76].

En otras acciones, el Emirato de Ajman, por ejemplo, introdujo en 2012 un “día sin bolsas de plástico” como campaña ambiental, y en 2013 Dubái lanzó una iniciativa: “decir no a las bolsas de plástico”, mediante la cual se logró una reducción del 20 % en los 2.900 millones de bolsas utilizadas anualmente en el Emirato [77]. Ensayos más recientes en la región han demostrado el éxito potencial de tales iniciativas [78], [79]. Entre otros acontecimientos prometedores dentro de la región, el Consejo Nacional Federal de Abu Dabi pretende, mediante su legislación, reciclar el 75 % de todos los residuos sólidos municipales en todo el país para 2021 [80], y esto se puede lograr haciendo un cambio de paradigma en las prácticas actuales de reciclaje y gestión de residuos sólidos en la región [4].

La Agencia de Medio Ambiente – Abu Dabi (EAD) redactó en 2019 una legislación nacional para abordar el problema de la basura de base plástica. La EAD ha desarrollado un proyecto completo de política plástica de uso único (2019–2021), que busca gestionar 15 de los plásticos de un solo uso más comunes que se encuentran en la basura marina en el mundo [4].

Para desarrollar planes de acción nacionales o en los emiratos, son primordiales la participación de las partes interesadas, las prácticas locales de gestión de residuos, la política gubernamental y la sensibilización del público [81]. El enfoque que se adopte en el desarrollo de los planes de acción regionales de la basura marina debe estar dirigido por estrategias, objetivos y acciones prioritarias con base en un análisis de la situación actual de la basura costera y marina en la región del ROPME. Esto, a su vez, se basa en información

recopilada a través de cuestionarios distribuidos a entidades gubernamentales esenciales y las partes interesadas en los Estados miembros del ROPME. En [4] se propone un plan de acción para ser implementado en el área del ROPME, el cual abarca los objetivos y las acciones conexas en los temas de 1) Gobernanza, 2) Investigación y seguimiento, 3) Sensibilización y educación y 4) Marcos jurídicos. La aplicación de un plan de acción regional de la basura marina deberá estar respaldada por un programa de seguimiento para identificar las fuentes primarias de basura marina, con la finalidad de notificar las intervenciones específicas y evaluar y analizar los progresos en relación con las metas y objetivos establecidos [4]. El desarrollo de un programa de seguimiento de la zona marítima de ROPME requiere la elaboración de un consenso sobre los métodos y organismos que se van a emplear, para así tener unanimidad en las decisiones que se planeen.

Conclusiones

Los desechos marinos son un desafío importante que amenaza el medioambiente oceánico y costero, sin una solución fácil en los próximos años. El problema es totalmente artificial y se extiende a las zonas costeras de todo el mundo. La acumulación de desechos marinos se debe en gran parte a la falta de conciencia y educación ambiental entre el público, reforzada con la mala gestión de la basura municipal en las ciudades costeras. Irán tiene unos 2.415 km de costas en el norte y sur del país que sufren gravemente el problema de los desechos marinos.

Es necesario desarrollar planes de acción nacionales y regionales para enfrentar la problemática de la basura marina, la cual debería ser una prioridad para los países que rodean la zona marítima de ROPME [4]. En todo el mundo cada vez más se están aplicando marcos nacionales y regionales, que podrían utilizarse para orientar la elaboración y ejecución de planes de acción ambiental en la región [81], [82].

Otra razón está relacionada con la construcción rápida de áreas costeras y el desarrollo de ciudades

aledañas al mar sin infraestructura adecuada para gestionar la basura municipal.

Para enfrentar esta problemática es necesario idear un plan integral de gestión de estos residuos sólidos para la región marítima del ROPME, apoyado en los procedimientos y políticas reglamentarias de la zona y así cumplir con la tarea de controlar la basura plástica marina.

Referencias

- [1] United Nations, "United Nations Convention of the Law of the Sea," 1982.
- [2] G. Brighty, D. Jones y J. Ruxton, "High level scientific review for 'A Plastic Oceans 'film,'" Plastic Oceans Foundation, 2017.
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP), *Marine Plastic Debris and Microplastics: Global Lessons and Research to Inspire Action and Guide Policy Change*, Nairobi: UNEP, 2016.
- [4] B. Lyons, W. Cowie, T. Maes and W. Le Quesne, "Marine plastic litter in the ROPME Sea Area: Current knowledge and recommendations," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 187, 2020.
- [5] M. Gómez, "El estudio de los residuos: definiciones, tipologías, gestión y tratamiento", *Serie Geográfica*, n.º 5, pp. 21-42, 1995.
- [6] A. Ruiz, "Guía para la implementación del programa piloto de reaprovechamiento de residuos sólidos en Humanga, Pucallpa y Tinga María", 2004. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/260964189/Guia-Implementacion-Programa-Piloto-de-Reaprovechamiento-de-Residuos-Solidos-Peru>
- [7] L. P. Vesco, "Residuos Sólidos Urbanos: Su Gestión Ambiental en Argentina", tesis de grado, Universidad Abierta Interamericana, 2006.
- [8] P. Lettieri and S. Al-Salem, "Thermochemical Treatment of Plastic Solid Waste," *Waste - A Handbook for Management*, chapter 17, pp. 233-242, 2011.
- [9] D. Brennecke, B. Duarte, F. Paiva, I. Caçador and J. Canning-Clode, "Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 178, pp. 189-195, 2016.

- [10] L. Parker, "Fast facts about plastic pollution," National Geographic News, 2018. [En línea]. Available: <https://www.nationalgeographic.com/news/2018/05/plastics-facts-infographics-ocean-pollution/>.
- [11] T. Townsend, "Eight million tonnes of plastic are going into the ocean each year. Plastic Waste Washed up on a Beach in Haiti," The Conversation, 2015. [En línea]. Available: <http://theconversation.com/eight-million-tonnes-of-plastic-are-going-into-the-ocean-each-year-37521>.
- [12] M. Al-Maaded, N. Madi, R. Kahraman, A. Hodzic and N. Ozerkan, "An overview of solid waste management and plastic recycling in Qatar," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 20, n° 1, pp. 186-194, 2012.
- [13] Y. Tachwali, Y. Al-Assaaf and A. Al-Ali, "Automatic multistage classification system for plastic bottles recycling," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 52, n° 2, pp. 266-285, 2007.
- [14] C. Meran, O. Ozturk and M. Yuksel, "Examination of the possibility of recycling and utilizing recycled polyethylene and polypropylene," *Materials & Design*, vol. 29, n° 3, pp. 701-705, 2008.
- [15] M. Araújo, J. Silva and M. Costa, "Anthropogenic Litter on Beaches with Different Levels of Development and Use: A Snapshot of a Coast in Pernambuco (Brazil)," *Frontiers in Marine Science*, vol. 5, p. 233, 2018.
- [16] S. Zafar, "MSW Generation in the Middle East," 2018. [En línea]. Available: <https://www.ecomena.org/tag/msw-generation-in-middle-east/>. [Último acceso: 18 Junio 2020].
- [17] A. Alsulaili, B. Al-Sager, H. Albanwan, A. Almeer and L. Al-Essa, "An integrated solid waste management system in Kuwait. In: *5th International Conference on Environmental Science and Technology*," vol. 69, pp. 55-59, 2014.
- [18] GPCA, "Gulf Petrochemical and Chemicals Association. GCC Plastics Industry Indicators 2016," 2016. [En línea]. Available: <https://www.gpca.org.ae/2017/04/07/gcc-plastics-industry-indicators-2016/>. [Último acceso: 18 Junio 2020].
- [19] Goldstein, "GCC Plastic Market 2017-2030: Industry Share, Size, Emerging Trends, Demand Analysis, Growth Driver, Regional Outlook," 2020. [En línea]. Available: <https://www.goldsteinresearch.com/report/gcc-plastic-market>.
- [20] BWR, "Bottled Water U.S. and International Development and Statistics," 2017. [En línea]. Available: <https://gpca.org.ae/wp-content/uploads/2018/03/GCC-Plastics-Industry-Indicators-2016.pdf>. [Último acceso: 18 Junio 2020].
- [21] P. Pandey, P., "Plastic Waste Management in UAE," 2016. [En línea]. Available: <https://www.ecomena.org/plasticuae/>. [Último acceso: 18 Junio 2020].
- [22] EEA, "Recycling of Municipal Waste," 2018. [En línea]. Available: <https://www.eea.europa.eu/airs/2018/resource-efficiency-and-low-carbon-economy/recycling-of-municipal-waste>. [Último acceso: 18 Junio 2020].
- [23] A. Al Lahou and M. Alsabbaagh, "Assessment of municipal solid waste management in the state of Kuwait," *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 10, n° 2, pp. 51-56, 2019.
- [24] A. Löhr, H. Savelli, R. Beunen, M. Kalz, A. Ragas and F. Van Belleghem, "Solutions for global pollution of marine litter," *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 28, pp. 90-99, 2017.
- [25] M. Haward, "The plastic pollution of the seas and oceans of the world as a kitchen and challenge in the governance of the oceans," *Nature Communications*, 2018.
- [26] C. Xi and Y. Ning, "A Brief Overview of Renewable Plastics," *Materials Today Sustainability*, vol. 7, 2019.
- [27] J. Shiber, "Plastic particle and tar pollution on beaches of Kuwait," *Environmental Pollution*, vol. 57, n° 4, pp. 341-351, 1989.
- [28] H. Khordagui and A. Abu-Hilal, "Man-made litter on the shores of the United Arab Emirates on the Arabian Gulf and the Gulf of Oman," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 76, n° 3-4, pp. 343-352, 1994.

- [29] M. Claereboudt, "Shore litter along sandy beaches of the Gulf of Oman," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 49, n° 9-10, pp. 770-777, 2004.
- [30] M. Rajabizadeh and E. Kamrani, "The preliminary assessment of abundance and composition of marine beach debris in the northern Persian Gulf, Bandar Abbas City, Iran," *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, vol. 96, n° 1, pp. 131-135, 2016.
- [31] T. Root, "Las colillas de cigarrillos también significan contaminación plástica tóxica," *National Geographic Society*, 27 Agosto 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2019/08/las-colillas-de-cigarrillos-tambien-significan-contaminacion-plastica-toxica> [Último acceso: 19 Junio 2020].
- [32] S. Dobaradaran, T. Schmidt, I. Nabipour, A. Ostovar, A. Raeisi, R. Saeedi, M. Khorsand, N. Khajehmadi and M. Keshtkar, "Cigarette butts abundance and association of mercury and lead along the Persian Gulf beach: An initial investigation," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, n° 6, pp. 5465-5473, 2017.
- [33] S. Dobaradaran, I. Nabipour, R. Saeedi, A. Ostovar, M. Khorsand, N. Khaeahmadi, R. Hayati and M. Keshtkar, "Association of metals (Cd, Fe, As, Ni, Cu, Zn and Mn) with cigarette butts in northern part of the Persian Gulf," *Tox Control*, vol. 26, n° 4, pp. 461-463, 2017.
- [34] C. Martin, H. Almahasheer and C. Duarte, "Mangrove forests as traps for marine litter," *Environmental Pollution*, vol. 247, pp. 499-508, 2019.
- [35] G. Murray, "Environmental implications of plastic debris in marine settings-entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, n° 1526, pp. 2013-2025, 2009.
- [36] G. de la Torre, "Microplásticos en el medio marino: una problemática que abordar", *Revista Ciencia y Tecnología*, vol. 14, n° 4, pp. 27-37, 2019.
- [37] A. L. Andrady, "The plastic in microplastics: A review," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 119, n° 1, pp. 12-22, 2017.
- [38] J. Jiang, "Occurrence of microplastics and its pollution in the environment: A review," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 13, pp. 16-23, 2018.
- [39] A. de Souza, W. Kloas, C. Zarfl, S. Hempel and M. Rillig, "Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems," *Global Change Biology*, vol. 24, n° 4, pp. 1405-1416, 2018.
- [40] Fundación Aquae, "Lista de contaminantes emergentes: los 'contaminantes desconocidos'" [En línea]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/contaminantes-emergentes/>. [Último acceso: 20 Junio 2020].
- [41] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband and T. Galloway, "Microplastics as contaminants in the marine environment: A review," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, pp. 2588-2597, 2011.
- [42] Y. Cho, W. Shim, M. Jang, H. Han and S. Hong, "Abundance and characteristics of microplastics in market bivalves from South Korea," *Environmental Pollution*, vol. 245, pp. 1107-1116, 2019.
- [43] M. Browne, T. Galloway and T. Thompson, "Microplastic - An emerging contaminant of potential concern?," *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 3, pp. 559-566, 2007.
- [44] A. Andrady, "Microplastics in the marine environment," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, pp. 1596-1605, 2011.
- [45] K. Ashton, L. Holmes and A. Turner, "Association of metals with plastic production pellets in the marine environment," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 60, n° 11, pp. 2050-2055, 2010.
- [46] C. Rochman, "The Complex Mixture, Fate and Toxicity of Chemicals Associated with Plastic Debris in the Marine Environment," *Marine Anthropogenic Litter*, pp. 117-140, 2015.
- [47] E. Teuten, J. Saquing, D. Knappe, M. Barlaz, S. Jonsson, A. Björn, S. Rowland, R. Thompson, T. Galloway, R. Yamashita, D. Ochi, Y. Watanuki, C. Moore, P. Viet, T. Tana et al., "Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife," *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 364, pp. 2027-2045, 2009.

- [48] PlasticsEurope, "Tipos de plásticos," [En línea]. Disponible en: <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics/large-family>. [Último acceso: 20 Junio 2020].
- [49] European Bioplastics, "What are bioplastics?," [En línea]. Available: <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>. [Último acceso: 20 Junio 2020].
- [50] X. Chen and N. Yang, "A Brief Overview of Renewable Plastics," *Materials Today Sustainability*, Vols. %1 de %27-8, 2019.
- [51] E. Rojo y T. Montoto, *Basuras marinas, plásticos y microplásticos: orígenes, impactos y consecuencias de una amenaza global*, Ecologistas en Acción, 2017. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/adjuntos-spip/pdf/informe-basuras-marinas.pdf>
- [52] S. Baulch and C. Perry, "Evaluating the impacts of marine debris on cetaceans," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 80, pp. 210-221, 2014.
- [53] D. Laist, "Impacts of Marine Debris: Entanglement of Marine Life in Marine Debris Including a Comprehensive List of Species with Entanglement and Ingestion Records," *Marine Debris: sources, impacts, and solutions*, pp. 99-139, 1997.
- [54] M. Stelfox, J. Hudgins and M. Sweet, "A review of ghost gear entanglement amongst marine mammals, reptiles and elasmobranchs," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 111, n° 1-2, pp. 6-17, 2016.
- [55] B. Farkas, B. Buzas, E. Gulyas and N. Maury, "A leatherback turtle found off Fujairah, United Arab Emirates," *Marine Turtle Newsletter*, vol. 1, n° 154, pp. 15-16, 2017.
- [56] EAD, "Environment Agency - Abu Dhabi," *Waste and Environment Annual Report*, 2016.
- [57] D. Shaw and R. Day, "Colour- and form-dependent loss of plastic micro-debris from the North Pacific Ocean," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 28, pp. 39-43, 1994.
- [58] S. Kashiwada, "Distribution of Nanoparticles in the See-through Medaka (*Oryzias latipes*)," *Environ Health Perspect*, vol. 114, n° 11, pp. 1697-1702, 2006.
- [59] A. Salvati, C. Aberg, T. dos Santos, J. Varela, P. Pinto, I. Lynch and K. Dawson, "Experimental and Theoretical Comparison of Intracellular Import of Polymeric Nanoparticles and Small Molecules: Toward Models of Uptake Kinetics," *Nanomedicine*, vol. 7, n° 6, pp. 818-826, 2011.
- [60] T. Cedervall, L. Hansson, M. Lard, B. Frohm and S. Linse, "Food Chain Transport of Nanoparticles Affects Behaviour and Fat Metabolism in Fish," *PLoS ONE*, vol. 7, n° 2, p. e32254, 2012.
- [61] G. Rossi, J. Barnoud and L. Monticelli, "Polystyrene Nanoparticles Perturb Lipid Membranes," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 5, n° 1, pp. 241-246, 2013.
- [62] J. Anderson, B. Park and V. Palace, "Microplastics in aquatic environments: Implications for Canadian ecosystems," *Environmental Pollution*, vol. 218, pp. 269-280, 2016.
- [63] A. Naji, M. Nuri and D. Vethaak, "Microplastics contamination in molluscs from the northern part of the Persian Gulf," *Environmental Pollution*, vol. 235, pp. 113-120, 2018.
- [64] P. Tourinho, J. Ivar and G. Fillmann, "Is marine debris ingestion still a problem for the coastal marine biota of southern Brazil?," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 60, n° 3, pp. 396-401, 2010.
- [65] M. Cole, P. Lindeque, E. Fileman, C. Halsband, R. Goodhead, K. Moger and T. Galloway, "Microplastic Ingestion by Zooplankton," *Environmental Science & Technology*, vol. 47, n° 12, pp. 6646-6655, 2013.
- [66] A. Watts, M. Urbina, S. Corr, C. Lewis and T. Galloway, "Ingestion of Plastic Microfibers by the Crab *Carcinus maenas* and its Effect on Food Consumption and Energy Balance," *Environmental Science & Technology*, vol. 49, n° 24, pp. 14597-14604, 2015.
- [67] A. Russel, C. Lewis, R. Goodhead, S. Beckett, J. Moger, C. Tyler and T. Galloway, "Uptake and Retention of Microplastics by the Shore Crab *Carcinus maenas*," *Environmental Science and Technology*, vol. 48, n° 15, pp. 8823-8830, 2014.
- [68] A. Trouwborst, "Managing marine litter: exploring the evolving role of international and european law in confronting a persistent environmental problem," *Utrecht Journal of International and European Law*, vol. 27, n° 73, pp. 4-18, 2011.

- [69] J. Jambeck, R. Geyer, C. Wilcox, T. Siegler, M. Perryman, A. Andrady, R. Narayan and K. Law, "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science*, vol. 347, n° 6223, pp. 768-771, 2015.
- [70] GESAMP, "Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment," In: P.J. Kershaw, Ed., *IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection*, vol. 90, 2015.
- [71] World Economic Forum, "Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company The New Plastics Economy —Rethinking the future of plastics," 2016. [En línea]. Available: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>. [Último acceso: 25 Junio 2020].
- [72] UNEP, "Single Use Plastics: A Roadmap for Sustainability," 2018. [En línea]. Available: <https://www.unep.org/resources/report/single-use-plastics-roadmap-sustainability> [Último acceso: 25 Junio 2020].
- [73] J. Clapp and L. Swanston, "Doing away with plastic shopping bags: international patterns of norm emergence and policy implementation," *Environment Pollution*, vol. 18, pp. 315-332, 2009.
- [74] F. Convery, S. McDonnell and S. Ferreira, "The most popular tax in Europe? Lessons from the Irish plastic bags levy," *Environmental and Resource Economics*, vol. 38, pp. 1-11, 2007.
- [75] R. Schnurr, V. Alboiu, M. Chaudhary, R. Corbett, M. Quanz, K. Sankar, H. Srain, V. Thavarajah, D. Xanthos and T. Walker, "Reducing marine pollution from single-use plastics (SUPs): A review," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 137, pp. 157-171, 2018.
- [76] D. Xanthos and T. Walker, "International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 118, pp. 17-26, 2017.
- [77] Gulf News, "Dubai Municipality Launches Campaign to Slash 500m Plastic Bags," 2013. [En línea]. Available: <https://gulfnews.com/uae/environment/dubai-municipality-launches-campaign-to-slash-500m-plastic-bags-1.1174280>. [Último acceso: 25 Junio 2020].
- [78] EAD, "Environment Agency - Abu Dhabi. Internal Report. Waitrose Plastic Bags Pilot Study," 2018.
- [79] The National, "Waitrose Abu Dhabi Trial Sees 75% Reduction in Single-Use Plastic Bags," 2018. [En línea]. Available: <https://www.thenational.ae/uae/waitrose-abu-dhabi-trial-sees-75-reduction-in-single-use-plastic-bags-1.746656>. [Último acceso: 25 Junio 2020].
- [80] Federal National Council, "Official Portal of the Government of the United Arab Emirates," 2018. [En línea]. Available: <https://u.ae/en/information-and-services/environment-and-energy/waste-management>. [Último acceso: 26 Junio 2020].
- [81] PERSGA/UNEP, "Marine Litter in the PERSGA Region. PERSGA, Jeddah," 2008. [En línea]. Available: http://www.persga.org/Files/Common/Flipping_Books_Downloads/Marine_Litter_in_the_PERSGA_Region.pdf [Último acceso: 25 Junio 2020].
- [82] SPREP, "Pacific Marine Action Plan: Marine Litter 2018-2025," 2018. [En línea]. Available: https://www.sprep.org/attachments/Circulars/prap_marine_litter.pdf. [Último acceso: 25 Junio 2020].
- [83] European Commission, "A European Strategy for Plastics in a Circular Economy," Brussels, 2018.

Mejía, Santiago, Upegui, Sergio (2021). La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria. Una revisión. Cuaderno Activa, 13, 41-60.



La pirólisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria. Una revisión

Pyrolysis and other methods of using tyre waste as an energy source for industry. A review

Santiago Andrés Mejía Madrigal¹, Sergio Augusto Upegui Sosa²

Recibido: 30 julio 2021. **Aprobado:** 30 marzo 2021.

Resumen: El continuo crecimiento del parque automotor en el mundo genera una constante producción de neumáticos de desecho en altos volúmenes, que representan una problemática para su adecuada disposición final o aprovechamiento. El objetivo de este artículo de revisión se concentró en identificar las principales técnicas de aprovechamiento para este tipo de residuos a partir de su aporte energético y potencial uso en la industria, se hizo particular énfasis en la técnica de pirólisis, comparando diferentes tipos de reactores y evaluando los rendimientos energéticos encontrados en la producción de aceite pirolítico. De esta forma, se identificaron técnicas adicionales con alta importancia actual a nivel internacional que podrían ser implementadas en un país como Colombia. Las técnicas de pirólisis de lecho fijo y cama fluidizada son las más

estudiadas, y han mostrado resultados entre el 55 y 60 % de rendimiento con temperaturas óptimas de calentamiento entre 450 y 550 °C. También es importante resaltar aquellos parámetros que influyen en el rendimiento final del aceite, los cuales, de acuerdo con la información recolectada, son: tamaños de partícula pequeños, tiempos de calentamiento cortos (de hasta 5 segundos) y composición de la materia prima, ya que, por ser productos con mayor porcentaje (alrededor del 30 %) de caucho natural, es posible obtener un producto de gran calidad con un poder calorífico de hasta 40 MJ/kg, el cual es comparable con combustibles como el biodiésel, keroseno, *fuel oil* ligero, entre otros, para ser usado como fuente de energía. Por todo ello se encuentra en la pirólisis una estrategia viable de aprovechamiento energético para los residuos de neumáticos.

1 Santiago Andres Mejia Madrigal título: Ing.Ambiental. Filiación institucional: Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia. País: Colombia, Ciudad: Medellín. Correo electrónico: santiago_mejia111@hotmail.com ORCID: N/A

2 Ing. Ambiental, Ms. C. Ing. Urbana. Filiación institucional: Grupo de Investigación GITIMA, Institución Universitaria Tecnológico de Antioquia. País: Colombia, Ciudad: Medellín. ORCID: 0000-0003-4261-5241

Palabras clave: Neumáticos de desecho, elastómeros, pirólisis, aceite pirolítico, aprovechamiento energético.

Abstract: The continuous growth of the automotive fleet worldwide generates a constant production of waste tires in high volumes, which represent a problem for their proper final disposal or use. The aim of this review was to identify the main advantage techniques for this type of waste, based on its energy contribution and potential use in industry, making a special highlight on the pyrolysis technique, comparing different types of reactors and evaluating the energy yields found in the generation of pyrolytic oil. In this way additional techniques with high current international importance were identified that could be implemented in a country like Colombia. Fixed bed and fluidized bed pyrolysis techniques are the most studied, which have shown results between 55 % and 60 % of efficiency with optimal heating temperatures between 450 °C and 550 °C respectively. It is also important to highlight that those parameters related with the final performance of the oil, which, according to the information collected, are: small particle sizes, short heating times (up to 5 seconds) and the raw material composition, since they are products with a higher percentage (around 30 %) of natural rubber, it is possible to obtain a higher quality product with a calorific value of up to 40MJ/kg, which is comparable to fuels such as biodiesel, kerosene, light fuel oil, and others, allowing to be used as an energy source. These reasons make the pyrolysis as a viable strategy for the energetic use of tyre waste.

Keywords: Tyre waste, elastomers, pyrolysis, pyrolytic oil, energy use.

Introducción

Los neumáticos son uno de los residuos que más se generan por el crecimiento continuo del parque automotor a nivel mundial, y que no solo se genera en altos volúmenes, sino que constantemente se evidencia la problemática que representan asociada a su adecuada disposición

final o aprovechamiento. Se trata de un residuo no biodegradable, que en su mayoría es enviado a los rellenos sanitarios, sin embargo, actualmente existen diversas aplicaciones que se le pueden dar a este tipo de residuos con diferentes fines de aprovechamiento [1].

“Neumáticos al final de su vida útil” (ELT, por sus siglas en inglés) o llantas de desecho son términos comunes dados a las llantas desgastadas, que no se pueden reutilizar en vehículos para el tráfico público, incluso después de recauchutar y reenganchar. Su eliminación o utilización adecuadas es un problema crónico para el medio ambiente y la salud humana, especialmente en países en desarrollo como China e India, ya que el caucho del neumático contiene (entre otros productos) estireno, un componente fuertemente tóxico y, por lo tanto, altamente perjudicial para los humanos [2]. Estos países están experimentando un crecimiento económico y poblacional robusto, lo que finalmente resulta en un aumento en el número de vehículos en las carreteras [3].

Se estima que en todo el mundo se produjeron en 2017 alrededor de 2,7 billones de residuos de llantas de automóviles, y alrededor de 1 billón de unidades fueron eliminadas, de las cuales aproximadamente 290 millones eran de los EE. UU., y de estas más del 50 % corresponden a aquellas que fueron descartadas por medio de quema o en rellenos sanitarios, sin ningún tratamiento [4]. De acuerdo con la Agencia para la protección del ambiente (EPA, por sus siglas en inglés), la combustión de neumáticos emite aproximadamente un 6 % en masa de partículas sólidas y volátiles con respecto a la masa de combustible quemado [5]. Además, se estima que la producción del parque automotor de vehículos aumente en un 4,1 % por año, con lo cual se llegaría a 3,2 billones de neumáticos para 2022 [6], y aunque existen fuentes de aprovechamiento que buscan mitigar sus impactos, estos siguen representando un riesgo para la salud, la seguridad y el ambiente [7].

Por otro lado, el agotamiento constante de los combustibles fósiles y el aumento de la demanda de energía han motivado a investigadores y

tecnólogos a buscar y desarrollar diferentes fuentes de ésta. El desperdicio de energía ha sido una importante forma de utilizar los residuos de manera sostenible, haciéndolos útiles para satisfacer esta demanda [8].

De acuerdo con su composición, los materiales de desecho pueden clasificarse como materiales fósiles y materiales de origen biológico, los neumáticos de desecho son uno de los residuos más importantes a base de material fósil. Mientras que los desechos biológicos tienen un gran potencial como componente para las principales fuentes de energía renovable, ya que pueden proporcionar al mundo una alternativa para la reducción del uso de combustibles fósiles, los materiales de desecho a base de un material fósil como los ELT, por ser un residuo muy importante en términos de contaminación ambiental y aspectos económicos, aún son caso de estudio como fuente de energía renovable [9].

Las principales alternativas empleadas hoy en día para la disposición y tratamiento de ELT son la incineración y el depósito en vertederos. Sin embargo, ambas están lejos de ser opciones de tratamiento óptimo, porque pueden generar problemas ambientales, como emisiones tóxicas y de gases de efecto invernadero, lixiviados, etc. Ha habido iniciativas para reducir el desperdicio de neumáticos a través de las estrategias de reciclaje y reúso.

Como se muestra en la Figura 1, existen algunas alternativas de tratamiento en las que se emplean los neumáticos de desecho, sin embargo, actualmente solo el 35 % de los neumáticos en promedio se recicla, y el 50 % se usa para producir combustible derivado de neumáticos (TDF, por sus siglas en inglés) en los EE. UU., según reporta la EPA [10].

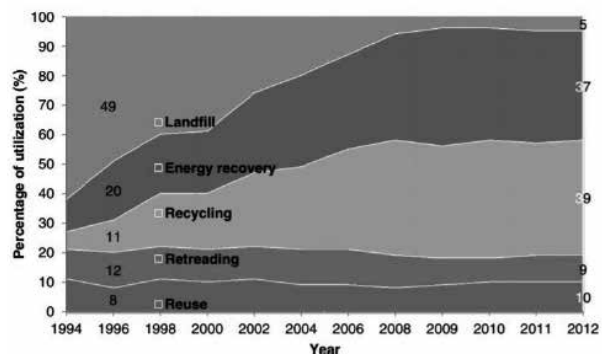


Figura 1. Desglose de la utilización de neumáticos usados en la UE de 1994 a 2012.

Fuente: Tomado de [1].

Vale la pena resaltar la importancia de un marco normativo que permita establecer una adecuada gestión de los residuos de ELT y motive a promover estrategias de aprovechamiento, como es el caso de la Unión Europea (UE), con su normatividad de Responsabilidad Ampliada del Productor (EPR, por sus siglas en inglés), mediante la cual se busca mejorar la recolección de residuos, reducir su generación mediante incentivos y diseño ecológico, y aumentar la eficiencia de los recursos a través de mayores tasas de reciclaje [11].

Se debe destacar que algunas de esas regulaciones incentivan a la industria para que utilice caucho reciclado en sus procesos, y en esta tendencia Taiwán fue pionero en llevar a la práctica dicha normatividad [12]. Posteriormente, Estados Unidos, Japón y los países de la UE incursionaron en este campo, de manera que hoy en día son las regiones con el mayor grado de desarrollo en cuanto a legislación sobre esta temática (ver Tabla 1).

Tabla 1. Normatividad sobre disposición y manejo de ELT

País	Norma	Año	Regulación
UE	Directiva 1000/31/EC	1999	Prohibición de la disposición de ELT enteros o triturados en los rellenos sanitarios [12].
UE	Directriz 2000/53/EC	2000	Establece que los neumáticos de los autos deben ser retirados antes de que estos sean chatarrizados [12].
UE	1222/2009	2009	Etiquetado y seguimiento de los neumáticos [12].
Colombia	Resolución 1457	2010	Modelo de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) para la gestión de ELT [13].
Colombia	Resolución 1326	2017	“Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de los neumáticos usados y se dictan otras disposiciones”.
Colombia	ANLA		La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales es la entidad del Estado encargada de hacer seguimiento a los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental, en este caso llantas usadas

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la información de la Tabla 1, en Colombia es insuficiente la normatividad que permita ser más estrictos respecto a la producción, manejo y disposición de neumáticos, por lo cual es importante tener un horizonte como países de la UE en esta parte normativa para mejorar la gestión de estos residuos.

El objetivo de esta revisión es identificar las diferentes técnicas de aprovechamiento de los neumáticos al final de su vida útil para la obtención de energía que pueda ser usada como fuente de suministro en la industria colombiana.

Para lo anterior, se aplicó una metodología de tipo exploratorio, se empleó como técnica de

recolección de la información la observación no participativa, a través de la selección y análisis de información cualitativa y cuantitativa relacionada con el objeto de estudio. Para esto se partió de una revisión bibliográfica en bases de datos indexadas sobre técnicas alternativas para el aprovechamiento de residuos de neumáticos, haciendo énfasis en aquellos tratamientos que permitieran un aprovechamiento energético de los mismos, y de esta manera poder registrar características y criterios empleados en los diferentes tratamientos identificados, con el fin de reconocer un panorama de procesos diferentes a la disposición final en rellenos sanitarios y que a futuro se puedan llevar a la práctica en nuestro país.

Situación de los neumáticos a nivel nacional

Colombia genera 5.300.000 llantas usadas al año, lo que equivale a 100.000 toneladas de residuos sólidos para el año 2015. De esa cifra, 2 millones se producen en Bogotá, un poco más de la cuarta parte (37,7 %), de acuerdo con informe del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, basado en el reporte del Programa Posconsumo de la ANDI [14]

En la Tabla 2 se muestra la generación por regiones de llantas usadas en Colombia, correspondiente a un valor total de 190.494 ton, lo que representa un aumento superior al 90 % en un periodo de dos años.

Tabla 2. Generación de llantas en Colombia por regiones.

Región	Porcentaje	Ton de llantas
Cundinamarca	28,22	53.760
Antioquia	18,31	34.881
Eje Cafetero	6,78	12.916
Costa Atlántica	13,72	26.137
Valle	17,27	32.900
Otras regiones	15,70	29.900

Fuente: tomado de [14 p. 79].

Por otra parte, con respecto a los puntos de recolección y almacenamiento, Colombia cuenta con 277 puntos de recolección y 187 centros de acopio distribuidos estratégicamente para garantizar la recolección y la gestión adecuada de las llantas usadas y lograr el cumplimiento de las metas. las llantas posteriormente serán utilizadas por diferentes industrias para usos energéticos o comerciales, como es el caso de Cementos Argos quien tiene un convenio con la Administración de Bogotá y que aprovecha alrededor de 20.000 ton/año como combustible alternativo en el horno cementero de Rioclaro mediante un proceso conocido como coprocesamiento.

Adicionalmente, de las llantas usadas se pueden obtener subproductos que son utilizados para mezcla asfáltica, canchas sintéticas, parques, combustible alternativo, etc. También se exportan a países como México para darles diferentes usos industriales. En Colombia existen 18 sistemas de recolección aprobados por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), de los cuales 7 son colectivos y agrupan 270 empresas importadoras de vehículos y neumáticos, los 11 restantes son individuales [15].

Definición y composición de los neumáticos

Un neumático es básicamente un elemento que permite a un vehículo desplazarse en forma suave a través de superficies lisas. Consiste en una cubierta principalmente de caucho que contiene aire, el cual soporta tanto el vehículo como su carga.

El ciclo de vida de un neumático consta de cinco pasos básicos: la extracción de las materias primas, la producción del neumático con las materias primas, el uso del neumático para vehículos/camiones, la recolección del neumático como desecho después del uso, y el procesamiento o reciclaje del neumático de desecho [16].

Los neumáticos comprenden más de cien compuestos diferentes, según el fabricante y el uso. Básicamente, están hechos de caucho (60-65 % en peso), negro de carbón (25-35 % en peso), rellenos (3 % en peso) y aceleradores [17]. Se utiliza una mezcla de caucho natural del árbol *Hevea brasiliensis* y caucho sintético derivado de productos del petróleo.

Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden variar según el tipo de esfuerzo al que son sometidos, volviendo a su forma cuando el esfuerzo se retira, siendo esta una de sus principales características, ya que poseen una estructura de red que puede deformarse a corto plazo bajo la influencia de fuerzas externas. Hoy en día alcanzan el 30 % del mercado de los cauchos, el resto lo ocupan los cauchos sintéticos, todos basados en hidrocarburos. Los tipos de caucho más empleados en la fabricación

de los neumáticos son: cauchos naturales (NR), polibutadienos (BR), estireno-butadieno (SBR) y polisoprenos sintéticos (IR). La matriz de caucho más utilizada es el copolímero estireno-butadieno (SBR), en la cual la proporción en peso de estireno es de aproximadamente un 25 %, o una mezcla de caucho natural y SBR. Todos los tipos de cauchos poseen diferentes propiedades, pero tienen algo en común: todos, una vez vulcanizados, pueden ser muy duraderos, por lo que requieren una gran cantidad de tiempo para su degradación [18].

Los cauchos y elastómeros que forman el componente de goma del neumático son una mezcla de varios cauchos reforzados con material de relleno de negro de humo, la construcción del neumático implica un compuesto de varias capas de caucho, material textil y correa y cordón de acero [19].

El negro de carbón, por su parte, se utiliza para fortalecer el caucho y permitirle resistir la abrasión, ya que aumenta la tenacidad y la resistencia a la torsión y al desgaste. Es además usado como pigmento y ayuda a disipar el calor de las zonas de la huella y el cinturón del neumático, de modo que reduce el daño térmico e incrementa la vida de la goma [19].

Para hacer que la goma sea más suave y trabajable, se adicionan rellenos o plastificantes para facilitar la preparación y elaboración de las mezclas, los cuales se utilizan para el control de la viscosidad, reducen la fricción interna durante el procesado y mejoran la flexibilidad a bajas temperaturas del producto: aceites minerales (aromáticos, nafténicos y parafínicos) y de tipo éster [19]. Además, se aplican otros componentes, a saber: azufre como agente vulcanizante, que se usa para entrecruzar las cadenas de polímeros en el caucho; acelerantes, que son compuestos órgano-sulfurados como benzotiazol y derivados, óxido de zinc y ácido esteárico y, finalmente, retardantes, como el N-nitroso difenil amina, usado como agente de curado de caucho y en resinas de intercambio iónico y decolorantes, y se emplea como promotor para adherir hilos de neumáticos al caucho.

Hoy en día, de estos componentes una pequeña porción es aprovechada a través de diferentes tratamientos, cuyo objetivo principal es recuperar el caucho triturado en varios tamaños y tipos para la obtención de energía (debido al alto contenido de carbono) [20], el aprovechamiento de sus fibras textiles, así como la fibra de acero, que juntos representan la porción principal de materia [21].

En la Figura 2 se presenta la composición de los neumáticos a) Neumático de carro, B) Neumático de Camión, la cual brinda una idea con respecto a las técnicas de valorización que se pueden investigar y a las estrategias de aprovechamiento según el producto que se quiera obtener al final, por lo cual su composición también puede variar de acuerdo con el uso al cual será destinado el neumático.

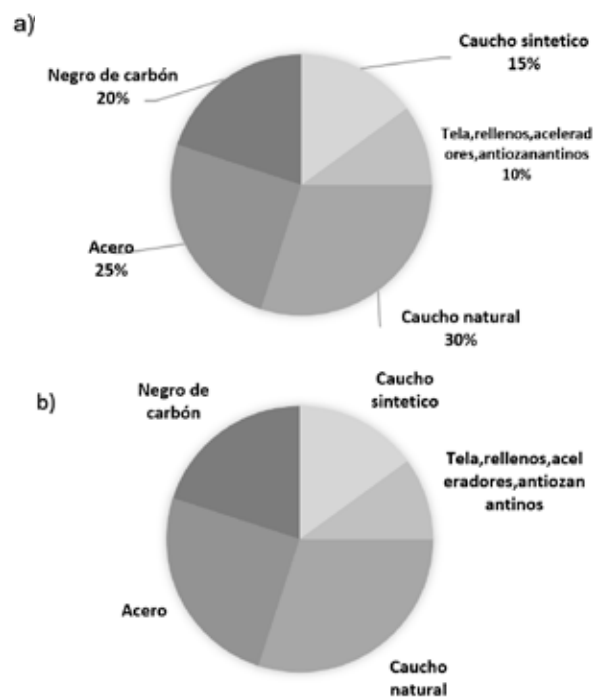


Figura 2. Composición de los neumáticos. a) Neumático de carro. b) Neumático de camión.

Fuente: Tomado de [22].

Otros materiales agregados al caucho para mejorar sus propiedades son: suavizantes, que aumentan su trabajabilidad antes de la vulcanización; óxido de zinc y de magnesio, comúnmente denominados

activadores, pues son mezclados para reducir el tiempo de vulcanización de varias horas a pocos minutos, y antioxidantes, para dar mayor vida al caucho sin que se degrade por la acción del oxígeno y el ozono [18].

Tabla 3. Composición química de neumático.

COMPOSICIÓN ELEMENTAL	
Carbono	70-83 %
Hidrógeno	5-7,5 %
Nitrógeno	1,50 %
Azufre	1,2-1,9 %
Oxígeno	5 %
Zinc	1,2-1,7 %
Hierro	5-18 %
Otros	5 %
ANÁLISIS PRÓXIMO	
Volátiles	62,10 %
Carbono fijo	29,40 %
Ceniza	7,10 %
Humedad	1,30 %

Fuente: tomado de [23].

Almacenamiento de neumáticos

El almacenamiento de ELT a cielo abierto tiene dos efectos perjudiciales principales: crea sitios para la reproducción de vectores como mosquitos dada la acumulación de agua estancada en ellos y genera afectaciones al aire debido a su ignición, ya que una vez iniciada es difícil de controlar [3].

Principales métodos de eliminación y aprovechamiento de neumáticos

Métodos de eliminación

Los métodos de eliminación de ELT más comúnmente usados son: vertederos, contención e incineración, los cuales han demostrado ser una amenaza para el medioambiente.

Relleno sanitario: La disposición de ELT consume una gran cantidad de tierra fértil de gran valor en usos productivos, especialmente en las áreas cercanas a la ciudad. Los neumáticos desgastados son materiales incompresibles y tienen más del 75 % de espacio ocupado por huecos. Proporcionan sitios potenciales para la cría de roedores y la recolección de gases. El gas metano (que se genera en los rellenos sanitarios y es producto de la descomposición misma del componente orgánico) es retenido por la presencia de neumáticos y ejerce una acción de flotador hacia arriba, que puede dañar o perforar los rellenos sanitarios. Este fenómeno se conoce como efecto burbujeante de los neumáticos de desecho. El efecto de burbujeo también puede conducir a la contaminación de los cuerpos de agua y destruye las bacterias convenientes para el suelo [3].

Quema de neumáticos: La quema de neumáticos no solo aumenta la temperatura del entorno, sino que también volatiliza toxinas al aire por la emisión de gases como hidrocarburos poliaromáticos, CO, SO₂, NO₂ y HCl. También libera contaminantes peligrosos del aire, como hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP), dioxinas, furanos, benceno, bifenilos policlorados (PCB) y metales como arsénico, cadmio, níquel, zinc, mercurio, cromo y vanadio [3]. La quema de neumáticos gastados y aglomerados conduce a la descomposición de parte del caucho que lo conforma en un material aceitoso, el cual es insoluble y genera contaminación en la superficie y en el agua subterránea por compuestos como azufre y dioxinas [3].

Aprovechamiento por reciclaje

La preocupación por la contaminación asociada con la eliminación de los neumáticos ha llevado a la búsqueda de tecnologías para reutilizar neumáticos desechados, que incluyen la valorización energética, y la introducción como materia prima en la construcción de edificios, en el procesamiento de la superficie de asfalto, en la industria del calzado, entre otras [24].

Para reciclar los neumáticos, sus materiales deben triturarse y luego separarse en sus componentes de caucho, acero y fibras textiles. Los posibles

materiales de salida se utilizan en la producción de asfalto modificado con caucho y para aplicaciones de ingeniería civil. Los productos derivados de neumáticos compuestos de pequeñas virutas se pueden usar para reemplazar materiales de construcción convencionales. Los beneficios de usar virutas de neumáticos en lugar de materiales convencionales son: una densidad reducida del material de construcción, mejores propiedades de drenaje, mejor aislamiento térmico y reducción de ruido [25].

Métodos de aprovechamiento térmico

Es bien sabido que los neumáticos poseen bajo contenido de cenizas de alta volatilidad y un poder calorífico superior al del carbón y de la biomasa. Estas propiedades los hacen materiales ideales para procesos térmicos como la pirólisis, la gasificación y la licuefacción [26].

El combustible derivado de neumáticos (TDF) se puede derivar de ELT de todo tipo, incluyendo neumáticos enteros o neumáticos triturados TDF, y se puede utilizar en instalaciones industriales, tales como fábricas de cemento, fábricas de papel y centrales eléctricas [25].

En 2017, alrededor del 40% de las llantas de desecho generadas en los EE. UU. fueron combustible para generación de energía en fábricas de papel y otras industrias, mientras que el 25 % se utilizaron como caucho molido para paisajismo, y alrededor del 8 % en otras aplicaciones civiles de ingeniería [27]. A pesar de que la combustión directa es útil para la generación de energía, como la energía térmica, las emisiones contaminantes producidas durante la combustión de neumáticos desalientan el uso de este proceso, en vista de las preocupaciones ambientales y de salud pública [28]. Como alternativa a esta problemática, la pirólisis y la gasificación son procesos termoquímicos avanzados, técnicas de conversión que ofrecen una gestión favorable de los residuos [6], en tanto se realiza un tratamiento y control de los contaminantes generados durante su proceso, sin embargo, también presentan sus inconvenientes, como son: la incapacidad de cumplir con los límites de control de contaminación, el daño corrosivo al equipamiento (como el colapso del techo y la

chimenea de acero de una planta de gasificación en Hamm-Uentrop, Alemania) por los problemas para mantener temperaturas de reacción adecuadas, y la ineficiencia energética [29].

Gasificación: “La gasificación es una oxidación subestequiométrica de la materia orgánica. Se define como un proceso termoquímico que tiende a ser más reactivo que otros procesos, el cual se lleva a cabo generalmente a temperaturas entre (700-1400 °C) y en presencia de una atmósfera reactiva parcialmente oxidativa. Implica el uso de aire, oxígeno (O₂), hidrógeno (H₂) o vapor de agua como agentes de reacción. Su eficiencia energética es alrededor del 76 % “. [26].

La gasificación de llantas de desecho es una ruta de utilización atractiva, ya que los productos gaseosos se pueden almacenar, transportar y, con ellos, alimentar fácilmente las calderas y cámaras de combustión existentes con pocas modificaciones (ver Figura 3) [30], [31]. La gasificación por vapor de neumáticos usados tiene el potencial de producir gas de síntesis de calidad. Sin embargo, los sistemas de gasificación convencionales requieren altas temperaturas para descomponer el material de alimentación y de reacciones que influye en la eficiencia general del proceso [32].

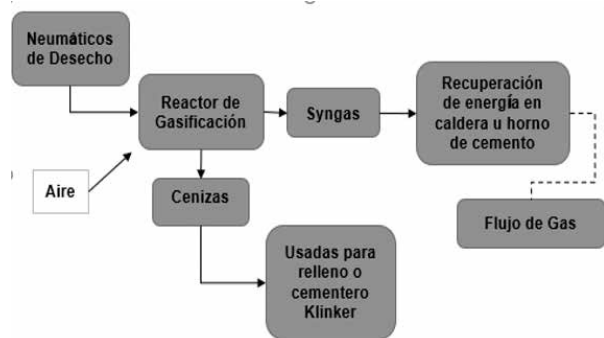


Figura 3. Proceso de gasificación.

Fuente: elaborado con base en [26] (Traducción propia).

Licuefacción: “La licuefacción es la conversión termoquímica de un sólido orgánico en petróleo como líquido. Típicamente, la licuefacción implica la producción de un líquido conformado por compuestos moleculares pesados con

propiedades similares, pero no idénticos a los de los combustibles derivados del petróleo. Los mecanismos involucrados en el proceso de licuefacción de neumáticos usados son: difusión de disolvente en el caucho, hinchazón de goma, degradación del caucho, disolución de caucho y separación del producto insoluble” [26].

Con esta técnica es posible un rendimiento de hasta el 90,2 %. Los neumáticos pueden licuarse individualmente o en combinación con otros materiales de desecho y/o carbón en esquemas de coprocesamiento, en procesos de una o dos etapas. La licuefacción proporciona un método efectivo para convertir el contenido orgánico en aceites [26](Muzenda, 2014).

Pirólisis: “La pirólisis es un proceso endotérmico que induce temperatura para la descomposición de materiales de alimentación sin la adición de gases reactivos, como aire u oxígeno. La eficiencia térmica de este proceso es aproximadamente del 70 % y puede aumentar al 90 % con el uso de productos pirolíticos como combustible [26] (Muzenda, 2014). El uso de neumáticos de menor tamaño como las virutas, en lugar de neumáticos enteros, también puede aumentar la eficiencia del proceso en un 20-30 %. Algunos de los problemas relacionados con el proceso son: el alto costo de la planta y el tratamiento de residuos” [26](Muzenda, 2014), los cuales oscilan aproximadamente entre \$8.000 y \$11.500 dólares por kW [29] (Wilson, 2017). La pirólisis generalmente ocurre a temperaturas entre 400 y 800 °C [33](Mohajerani et al., 2020). En la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo esquemático para un proceso de pirólisis.

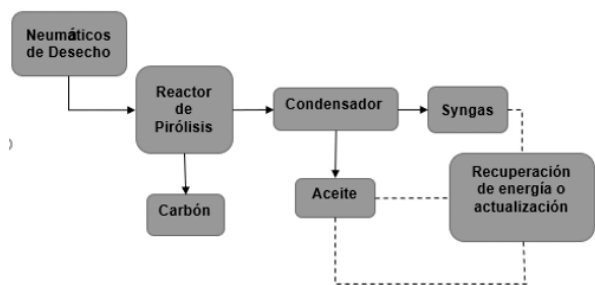


Figura 4. Proceso de pirólisis.

Fuente: elaborado con base en [26] (Traducción propia).

De acuerdo con los parámetros operativos, la pirólisis se puede clasificar como pirólisis lenta, rápida y *flash*.

La pirólisis lenta ocurre a una temperatura de proceso más baja, una velocidad de calentamiento más baja y tiempos de residencia más largos, lo que favorece la producción de carbón. La pirólisis instantánea o *flash* es el proceso en el que el tiempo de reacción es de solo varios segundos, o incluso menos, y la velocidad de calentamiento es muy alta; debido al rápido calentamiento, el tamaño de las partículas debe ser pequeño. La pirólisis rápida favorece la formación de bioaceite y se produce a una temperatura moderada, un tiempo de residencia corto del vapor y alta velocidad de calentamiento.

La pirólisis rápida para la producción de líquidos se ha desarrollado considerablemente en los últimos años. Los productos líquidos ofrecen importantes ventajas en almacenamiento y transporte. La tecnología de pirólisis rápida puede tener costos de inversión relativamente bajos y alta eficiencia energética en comparación con otros procesos, especialmente a pequeña escala tiene inversiones de capital menores, eficiencia mejorada y aceptabilidad ambiental [34], como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros operativos y productos típicos para el proceso de pirólisis.

Técnica pirolítica	Período de asentamiento sólido (min)	Velocidad de calentamiento (°C / s)	Tamaño de grano (cm)	Temperatura. (°C)	Producir (proporción)		
					Aceite	Carbón	Gas
Lento	7,5-9,16	0,1-1	0,5-5	277-677	0,30	0,35	0,35
Rápido	0,0083-0,16	10-200	<0,1	577-977	0,50	0,20	0,30
Flash	<0,0083	>1000	<0,02	777-1023	0,75	0,12	0,13

Fuente: [35].

Otros autores [34], [36], mencionan al respecto que el tipo de biomasa usada también tiene un efecto en el proceso, donde numerosos estudios mostraron que la temperatura para obtener mayores rendimientos líquidos oscila entre 450 y 550 °C, sin embargo, de acuerdo con la biomasa usada algunos obtienen mayores rendimientos a temperaturas que oscilan entre 650 y 800 °C.

Tipos de reactores: La etapa de reacción, en la que se realiza el proceso de pirólisis, se puede llevar a cabo usando diferentes tecnologías que dependen de la naturaleza del lecho del reactor y de aspectos prácticos de su operación. A continuación, se presentan los principales tipos de reactores según la literatura y por su aplicabilidad industrial:

- **Reactor de lecho fluidizado.** Es el reactor más estudiado y desarrollado por su amplia aplicabilidad en la industria petrolera para reacciones de *cracking* catalítico, tiene una configuración vertical y en procesos de pirólisis la materia prima es alimentada por la parte superior del reactor para que al llegar al fondo entre en contacto con el medio fluidizado de transferencia de calor, el cual, por lo general, es arena u otro sólido inerte. El medio fluidizado cumple la función de mejorar la transferencia de calor o actuar como catalizador del proceso, además, su calentamiento puede ser directo, o de forma indirecta por medio del gas de fluidización, que es de carácter inerte con respecto a la materia prima o el sustrato que se va a descomponer térmicamente [37]. Los reactores de lecho fluidizado operan en condiciones de pirólisis rápida, lo que mejora el rendimiento del aceite de pirólisis. Además, esta tecnología facilita el funcionamiento continuo, lo que es de gran relevancia para la ampliación del proceso. Sin embargo, estos reactores son de diseño y operación complejos y, además, requieren una mayor inversión que otras tecnologías, lo que dificulta su utilización. Otro punto que debe evaluarse cuidadosamente es el pequeño tamaño de partícula requerido para los neumáticos [38].
- **Reactor de cono rotatorio.** Consta de un recipiente de reacción vertical en el que un lecho o cama de materia prima está en contacto directo con un lecho de calentamiento de arena u otro sólido inerte, donde se mezcla mecánicamente aprovechando el momento angular del cono, lo cual reduce el consumo de gas de fluidización y mejora la transferencia de calor, su calentamiento también puede ser directo o indirecto. Sin embargo, su uso se ha restringido a plantas piloto y no ha sido escalado a escala industrial [37].
- **Reactor de tornillo sinfín.** Su funcionamiento es análogo al esquema de funcionamiento para un reactor de cono rotatorio, en donde la materia prima entra en contacto directo con el lecho de calentamiento y se mezcla el conjunto en un recipiente horizontal por medio de un tornillo sinfín. Este reactor no usa gas de fluidización y su calentamiento es de tipo indirecto por medio de una chaqueta de calentamiento con gases de combustión [37].
- **Reactor de lecho fijo.** A diferencia de un reactor de lecho fluidizado, son recipientes verticales en los que se calienta únicamente el fondo del reactor, lo que genera un perfil térmico a lo largo de sus paredes, su calentamiento es, en la mayoría de los casos, indirecto para evitar fluidización en el lecho fijo, aunque en algunos casos emplea una corriente de gas inerte de arrastre para extraer la fracción volátil generada y evitar fenómenos de reflujo de condensados y reacciones de craqueo secundarias indeseadas [37]. Este es uno de los procesos más usados en la pirólisis de neumáticos, principalmente a escala de laboratorio. El principal interés de los reactores de lecho fijo radica en su fácil diseño y funcionamiento, ya que no tienen limitación en cuanto al tamaño de las partículas de los neumáticos. Sin embargo, estos reactores se caracterizan por su baja tasa de transferencia de calor y su complejo control de las condiciones operativas, especialmente la temperatura. Además, su ampliación es un desafío notable debido, por un lado, a las severas limitaciones de

transferencia de calor a medida que aumenta el volumen del reactor y, por otro lado, a grandes dificultades para el funcionamiento continuo. Por lo tanto, la baja capacidad específica limita el interés económico de los reactores de lecho fijo para aplicaciones a gran escala [38].

- **Reactores de horno rotatorio.** Es el tipo de reactor más usado industrialmente por su gran similitud con los hornos rotatorios de la industria cementera, aunque en procesos de pirólisis su calentamiento se da de manera indirecta con gases de combustión para prevenir fluidización de la materia prima y operaciones de separación de material sólido suspendido en la fracción volátil. La configuración del reactor es totalmente horizontal u horizontal con una leve inclinación, lo cual permite operar el proceso de manera discontinua o continua respectivamente [37], en unos procesos realizados, según [39], en Kobe Steel (Japón), el Centro de Investigación ENEA (Italia) y la Universidad de Kassel (Alemania). Se obtuvieron mayores rendimientos de aceite operando a 550 °C, junto con los rendimientos de gas más bajos, sin embargo, el carbón no pareció verse afectado significativamente por los cambios de temperatura.

Principales parámetros de operación: entre los parámetros más influyentes en los procesos de pirólisis se destacan los que tienen mayor efecto en el producto del aprovechamiento.

Los parámetros del proceso afectan fuertemente el rendimiento y la composición de los productos de pirólisis, debido a las diversas reacciones químicas que se favorecen en cada condición. Los principales parámetros son: tamaño de partícula, velocidad de calentamiento, temperatura de pirólisis, velocidad de flujo de gas, velocidad de alimentación, tiempo de retención y composición de biomasa [34].

- **Temperatura:** Esta es la principal variable a tener en cuenta dentro del proceso de pirólisis, por ser la que más lo afecta. La temperatura óptima (a presión ambiente) para la conversión total del neumático son los 500 °C [28].

La producción de aceite pirolítico oscila entre los 425 y los 720 °C, y los rendimientos máximos varían entre 38 y 60 %, lo cual se relaciona estrechamente con la velocidad del flujo másico del neumático y el tamaño de las partículas, el tipo de reactor y el tiempo de residencia, ya que en algunos casos estos parámetros pueden ocasionar reacciones secundarias que convierten compuestos líquidos en gaseosos o gaseosos en fase sólida, según [40].

Algunos rendimientos del bioaceite, como se menciona en [34], dependen de la biomasa usada, es el caso de la cáscara de arroz, con la cual se observó un aumento en el rendimiento de aceite cuando la temperatura de pirólisis cambia de 400 °C a 500 °C, de 11,26 % a 35,92 %, respectivamente. Sin embargo, por encima de 500 °C el rendimiento aumentó a un ritmo menor con el aumento de temperatura y alcanzó el 40 % a 800 °C; con la semilla de mango almendra la temperatura de pirólisis osciló entre 450 °C y 650 °C. El rendimiento máximo de bioaceite obtenido fue del 38,8 % a la mayor temperatura (650 °C).

- **Velocidad de calentamiento:** La velocidad de calentamiento y la temperatura final son variables independientes y se pueden parametrizar de forma separada. Sin embargo, las velocidades de calentamiento más rápidas conducen a temperaturas más altas, lo que puede llevar a más reacciones secundarias que pueden producir más productos en fase gaseosa [40]. Se ha encontrado que altas velocidades de calentamiento reducen el contenido de agua en el bioaceite, producto de la pirólisis, y también en el contenido de oxígeno en el producto líquido de la pirólisis, por reacciones que favorecen la formación de gases como el dióxido de carbono y el monóxido de carbono en dicho producto [34]. La velocidad de calentamiento está relacionada con el tipo de reactor, y algunos de ellos producen velocidades más altas de calentamiento [40], [28].
- **Tamaño de la partícula:** A partículas más pequeñas se tienen temperaturas uniformes durante el proceso de pirólisis, aunque existe la

probabilidad de pasar fácilmente de fase líquida a una fase gaseosa, mientras que tamaños de partículas más grandes tienen un calentamiento menos uniforme, debido a una afectación en la transferencia de calor y por lo tanto la pirólisis ocurre a una temperatura más baja [28].

Según se afirma en [40], partículas pequeñas con tamaños aproximados de 0,32 mm generan un mayor producto en fase líquida (50 % en peso), mientras que partículas de mayor tamaño, 0,8 mm, generan un 40 % en peso.

La transferencia de calor durante la pirólisis presenta dificultades porque la biomasa es un mal conductor del calor. Por lo tanto, el tamaño de las partículas influye en el rendimiento del bioaceite producido y es fundamental para minimizar los problemas de transferencia de calor en el proceso [34].

- **Composición de la materia prima (neumático):**

Este parámetro tiene una gran influencia en las variaciones del rendimiento líquido y el contenido de azufre dentro del producto final. Alsaleh y Sattler [40] encontraron que neumáticos con mayor contenido de caucho natural generaban una mayor cantidad de aceite (55,6 % en peso) con un menor contenido de azufre (0,83 % en peso), en comparación con los neumáticos con mayor contenido de caucho sintético, que generaban 47,4 % en peso de aceite con 1,35 % en peso de azufre, lo que traduce su uso final, siendo los de caucho sintético más usados para la producción química por su mayor contenido aromático, mientras que neumáticos con mayor contenido de caucho natural tienen más potencial como combustible.

- **Tiempo de pirólisis:** El tiempo de pirólisis está relacionado con la velocidad de calentamiento: velocidades de calentamiento más bajas que requieren tiempos de pirólisis más largos. Los tiempos de residencia más largos requieren un reactor más grande, con mayores costos de capital. Finalmente, varios investigadores han encontrado una compensación de tiempo

y temperatura: temperaturas más altas que requieren tiempos de residencia de neumáticos más cortos, y temperaturas más bajas requieren tiempos de residencia más largos [34].

En resumen, se mencionaron algunos de los parámetros más influyentes que se deben tener en cuenta para la proyección de un esquema financiero, con el fin de obtener mayor precisión al momento de introducir este proceso como fuente de energía para abastecer el suministro en procesos industriales [40].

Análisis del aprovechamiento térmico de la pirólisis utilizando residuos de neumáticos

Con respecto a los reactores de pirólisis para la obtención de aceite que puede ser potencialmente usado como fuente de energía, se presentan las proporciones halladas en los estudios evaluados que mayor información brindan, el panorama muestra que son los reactores de cama fija (27 % de participación), de lecho fluidizado y de horno rotativo (con 20 % de participación cada uno) (Figura 5), los que presentan más ventajas. De los estudios evaluados, el proceso de pirólisis en lecho fluidizado ha despertado gran interés debido a que estos presentan diferentes ventajas; tales como: estructura simple, utilización de diferentes diámetros de partículas, fácil operación, fácil escalado, altos flujos de transferencia de calor y masa y altos rendimientos de los productos líquidos [41], los cuales presentan resultados similares o datos cercanos a los obtenidos por otros autores en cuanto a niveles de rendimiento del aceite [23], [42], [43].

Sin embargo, es importante resaltar la necesidad de aunar esfuerzos para obtener mejor información en otros procesos, como los de reactores al vacío, los cuales pueden permitir obtener rendimientos altos, que fueron del 60 % a temperaturas óptimas medias de 425 °C, según los datos encontrados, lo cual abre una puerta a tecnologías sobre las cuales se debe seguir siendo investigando y ampliar la información con el fin de hallar mayor número de similitudes en los estudios.

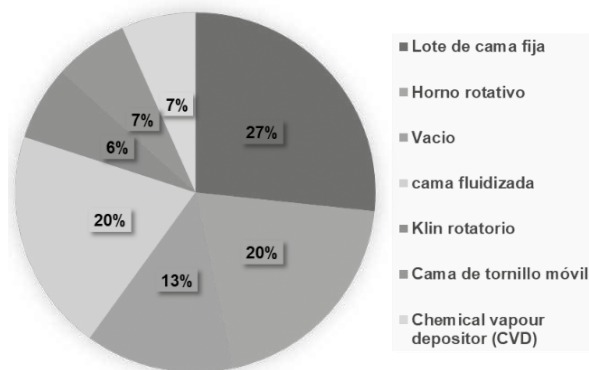


Figura 5. Porcentaje de los tipos de reactores para aprovechamiento de neumáticos.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la información recolectada en la literatura, con respecto a los principales factores que influyen para una adecuada eficiencia en la pirólisis, teniendo en cuenta los tipos de reactores, se desglosan en la Tabla 4 los principales parámetros de operación en el proceso de pirólisis según el tipo de reactor, para obtener un rendimiento adecuado, tales parámetros son: velocidad de calentamiento, tamaño de partícula, masa del neumático y temperatura de operación. De esta manera, se logran obtener datos comparativos respecto de temperaturas óptimas de calentamiento y porcentaje de máximo rendimiento, los cuales permiten obtener un alto rendimiento y un producto de calidad sin exceder de manera innecesaria el gasto de energía; es así como algunos estudios [23], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49] determinan valores tanto para temperaturas óptimas de calentamiento como para el porcentaje de máximo rendimiento, los cuales son de gran utilidad al momento de implementar una tecnología de valoración energética.

De acuerdo a la información detallada, se pueden extraer datos como masas de neumático bajas, de alrededor 0,025 kg, asociadas a pequeños tamaños de las partículas de 5 cm aproximadamente que alimentan el reactor, contribuyen en alta medida a la favorabilidad de la pirólisis y permiten un cambio de estado sólido a líquido adecuado de

la materia prima, sin generar gran cantidad de reacciones secundarias que finalmente afecten el rendimiento del producto.

Con base en los parámetros detallados en la Tabla 4, es posible identificar y controlar, de acuerdo con el tipo de reactor que se emplee para el desarrollo de una pirólisis con una biomasa de ELT, la calidad del rendimiento del producto de aceite pirolítico final, porque un porcentaje alto o bajo de uno de estos parámetros puede generar una reacción innecesaria o inadecuada en el proceso. Según [40], estos factores secundarios pueden influir particularmente en las reacciones secundarias, que convierten los compuestos líquidos en fase gaseosa, o la fase gaseosa en fase sólida, es decir, pueden afectar la composición del gas y el líquido, así como el tiempo de pirólisis y el gasto de energía en el proceso.

En la Figura 6 se relacionan los diferentes estudios por tipo de reactor, y se presentan valores de rendimiento a partir de temperaturas óptimas, las cuales se obtuvieron bajo condiciones y parámetros establecidos, como son: masas de neumáticos, tamaños de la partícula y velocidades de calentamiento; a partir de la velocidad se puede obtener una temperatura óptima de calentamiento, la cual es la variable más influyente para un adecuado rendimiento, y se ha encontrado que los mayores niveles de rendimiento se presentan a temperaturas aproximadas a los 450 °C y 550 °C, llegando a obtener rendimientos entre el 50 y el 60 %. Es decir que no se requiere llevar el sistema a temperatura muy elevada para obtener un mejor rendimiento, lo cual se demuestra en [50], donde se mostró que durante la pirólisis de neumáticos usados en un reactor de lecho fijo las condiciones óptimas de rendimiento del líquido fueron: un tamaño de partícula igual a 4 cm, una temperatura experimental de 475 °C y un tiempo de residencia de 5 s. Mientras que en [42] el estudio se centró en la influencia de la alimentación por tamaño en los rendimientos del producto de pirólisis, y mostró que el tamaño de partícula más grande favorece la descomposición incompleta, lo que genera un aumento en el residuo sólido y el pirogás y una cantidad limitada de aceite, lo que se traduce en un menor rendimiento. Sin embargo, en [51] se

menciona que los rendimientos y las propiedades del producto dependen en gran medida de diferentes factores, a saber: la velocidad de calentamiento, el tamaño de partícula, la composición de la materia prima, el tiempo de pirólisis y el tipo y el diseño del reactor, donde la temperatura es un factor predominante que influye en la distribución de productos de pirólisis en fase sólida, gaseosa y líquida y en sus propiedades fisicoquímicas.

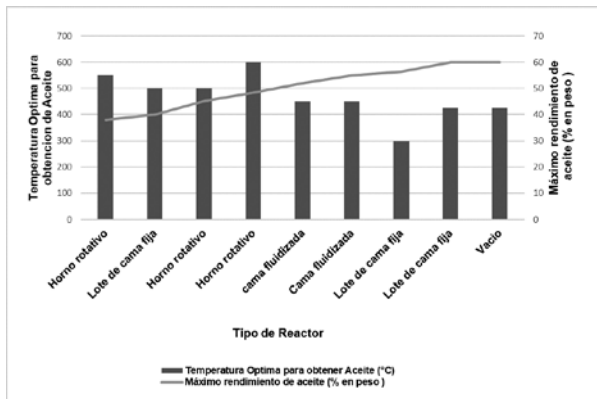


Figura 6. Máximo rendimiento de aceite frente a temperatura óptima.

Fuente: elaboración propia.

Por último, en la Figura 7 se agruparon los reactores por tipo para lograr visualizar de forma más detallada y clara los resultados obtenidos con ellos por los diferentes autores (ver Tabla 4), así como los mayores rendimientos obtenidos a bajas temperaturas, lo cual no solo brinda información de lo hallado en los estudios, como parámetros de condiciones de laboratorio, tiempos, velocidades de calentamiento, etc., bajo los cuales pueden ser replicados, ya sea para un estudio en laboratorio o a nivel industrial bajo los parámetros descritos. Esto es un gran aporte a la investigación, porque se puede garantizar menor gasto energético para obtener un producto. Los datos más similares se lograron a través de reactores de cama fluidizada, siendo estos una de las tecnologías comúnmente utilizadas, como se argumenta en [52], donde los

reactores de cama fluidizada son los más usados y despiertan mayor interés, ya que la fluidización del lecho mejora la transferencia de calor de la materia prima, porque el movimiento de las partículas generado por el gas de arrastre permite un incremento en la tasa de degradación térmica al exponer de manera directa cada partícula al flujo de calor. Sin embargo, la dificultad al construir este tipo de reactor es que se requiere una cantidad de espacio considerable. Además, es importante considerar que la cantidad de gases que produce la pirólisis incrementa con la cantidad de materia prima que la alimenta, la cual es una variable que depende de las dimensiones del reactor, adicionalmente, tiende a presentarse mayor rendimiento y producción de aceite a medida que el tamaño de la partícula disminuye.

Es decir, la principal ventaja de este tipo de lecho fluidizado, según [53], es homogeneizar la tasa de degradación de la materia prima, esto es, lograr que la velocidad de degradación térmica de cada partícula sea homogénea para cada una, lo cual permitiría obtener rendimientos de fase líquida mucho más altos, porque todas las partículas reciben energía en la misma proporción.

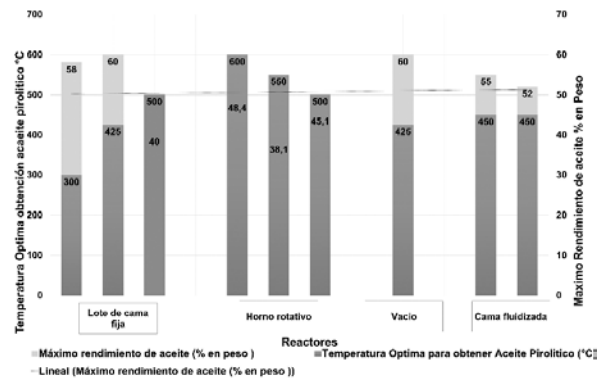


Figura 7. Agrupación de reactores: Máximo rendimiento de aceite frente a temperatura óptima

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Resumen de los parámetros que influyen en el rendimiento del aceite.

Autor (año)	Tipo de reactor	Masa del neumático ^a	Tamaño de la partícula (mm)	Rango de temperatura (°C)	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Temperatura óptima para obtener aceite pirolítico (°C)	Máximo rendimiento de aceite (% en peso)
Williams y Taylor (1990) [54]	Lote de cama fija	0,05 (a)	S. I.	300-720	5-80	300	54-58,8
Kar (2011) [48]	Lote de cama fija	0,01 (a)	S. I.	375-500	10	425	60
Aydina and C. İli-İkiliçb (2012) [47]	Lote de cama fija	S. I.*	S. I.	400-700	S. I.	500	40
Aylón et al. (2008) [44]	Horno rotativo	3,5-8 (b)	S. I.	600-800	S. I.	600	48,4
Galvagno et al. (2002) [45]	Horno rotativo ^b	4,8 (b)	S. I.	450-700	S. I.	550	38,1
Hu et al. (2014) [46]	Horno rotativo	S. I.	S. I.	450-650	S. I.	500	45,1
Shah et al. (2008) [49]	Vacío	S. I.	S. I.	375-500	10	425	60
Williams y Brindle (2003) [23]	Cama fluidizada ^c	0,22 (b)	S. I.	450-600	S. I.	450	55
Dai (2001) [42]	Cama fluidizada ^d	S. I.	S. I.	360-810	S. I.	450	52
Osayi et al. (2018) [43]	Cama fija	S. I.	1-4	400	S. I.	S. I.	38,80
	Cama fluidizada	S. I.	0,8-1,6	750	5-35	S. I.	31,9
	Vacío	S. I.	20 a 60	550	S. I.	S. I.	47,10
	Klin rotatorio	S. I.	13-15	500	20	S. I.	45,10
	Cama de tornillo móvil	S. I.	5	600	S. I.	S. I.	S.I.
	Depositantes de vapores químicos (CVD)	S. I.	6	600	15	S. I.	34,04

^a(a) kg, (b) kg h⁻¹

^bEscala de laboratorio

^cEscala de laboratorio

^dEscala de laboratorio

* S. I. = Sin Información.

Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Los neumáticos (ELT) son hoy en día una problemática ambiental y de salud pública para muchos países del mundo, sin embargo, existen diversas alternativas no solo para su disposición final adecuada, sino para su aprovechamiento energético, lo que los hace de interés para ser usados como combustible, a fin de satisfacer las necesidades de muchas industrias y así disminuir el consumo de combustibles fósiles. La pirólisis es principalmente una alternativa viable que permite obtener tres tipos de combustible (sólido, líquido y gas), de acuerdo con la necesidad.

Los países en vía de desarrollo enfrentan una gran dificultad que tiene que ver con el factor de crecimiento poblacional, que con el paso de los años va a limitar los medios y sitios para realizar la disposición de gran parte de sus residuos, como los rellenos sanitarios, las combustiones o las alternativas de almacenamiento; de ahí que se deba fomentar el desarrollo y puesta en práctica de técnicas alternativas de aprovechamiento, como la pirólisis, la gasificación y la licuefacción, entre otras, las cuales permiten no solo disminuir el impacto al medioambiente sino que también generan una fuente de energía con estos residuos al final de su vida útil.

Actualmente en Colombia se evidencia la necesidad de una normativa que promueva el uso de estas tecnologías a través de incentivos que apoyen iniciativas de productores, generadores y consumidores de estos residuos de neumáticos, y así mejorar las tasas de aprovechamiento y mitigar el riesgo asociado a disposiciones inadecuadas, tanto en el medioambiente como en los rellenos sanitarios.

La pirólisis como medio para obtener energía (aceite pirolítico), a través de una fuente de masa como lo son los ELT, ofrece una ventaja que es la capacidad para tratar residuos difícilmente reciclables, para hacerlos reutilizables, descomponiéndolos en elementos más simples. Este tratamiento se usa para convertir los desechos en combustibles de alto poder calorífico, químicos, monómeros y otros

materiales valiosos y va a depender de diferentes factores como la velocidad de calentamiento, el tamaño de partícula, la composición de la materia prima, el tiempo de pirólisis y el tipo y diseño del reactor. Sin embargo, se encontró que el tamaño de partícula más grande favorece la descomposición incompleta, lo que genera un aumento en el residuo sólido y el gas con una cantidad limitada de aceite.

De acuerdo con los estudios revisados, los rendimientos del aceite obtenido mediante pirólisis según el tipo de reactor fueron superiores al 40 %. La temperatura, el tamaño de partícula y la velocidad de calentamiento tienen efectos importantes en el rendimiento de los productos de pirólisis. Una temperatura óptima apreciable son los 550 °C, en la que se completa la pirólisis del neumático y se obtienen los mismos rendimientos que a temperaturas más altas.

El principal interés en la valorización de neumáticos a partir de la pirólisis radica en la obtención de productos como gas, negro de humo y bioaceite, cuyo rendimiento y composición están limitados por la condición de la pirólisis, y en el caso del bioaceite, muchas veces el uso de catalizadores afecta su uso como combustible, debido a los hidrocarburos presentes, como aromáticos, parafinas, olefinas.

Es necesario ahondar más al respecto del aceite pirolítico, ya que es uno de los principales subproductos obtenidos de los diferentes procesos de aprovechamiento en la pirólisis, sin embargo, sigue siendo un reto indagar más sobre las limitantes asociadas a estos en su aplicación y potencial uso.

Referencias

- [1] J. Domingues, T. Marques, A. Mateus, P. Carreira, & C. Malça, "An additive manufacturing solution to produce big green parts from tires and recycled plastics", *Procedia Manufacturing*, n.º 12, December 2016, pp. 242-248. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.028>

- [2] A. Siddika, M. A. Al Mamun, R. Alyousef, Y. H. M. Amran, F. Aslani, & H. Alabduljabbar, "Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review", *Construction and Building Materials*, n.º 224, pp. 711-731, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108>
- [3] J. S. Yadav and S. K. Tiwari, "The impact of end-of-life tires on the mechanical properties of fine-grained soil: A Review", *Environment, Development and Sustainability*, vol. 21, n.º 2, pp. 485-568. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-0054-2>
- [4] S. M. Samidi M. K. Samarakoon, P. Ruben, J. Wie and L. Evangelista, "Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste", *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, 2019, e00259. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00259>
- [5] E. B. Machin, D. T. Pedroso and J. A. de Carvalho, "Energetic valorization of waste tires", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, 306-315, February 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.110>
- [6] M. Policella, Z. Wang, K. G. Burra, & A. K. Gupta, "Characteristics of syngas from pyrolysis and CO₂-assisted gasification of waste tires", *Applied Energy*, vol. 254, July 2019, 113678. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113678>
- [7] W. Ruwona, G. Danha and E. Muzenda, "A Review on Material and Energy Recovery from Waste Tyres", *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 216-222, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.029>
- [8] M. S. Hossain, M. R. Islam, M. S. Rahman, M. A. Kader and H. Haniu, "Biofuel from Co-pyrolysis of Solid Tire Waste and Rice Husk", *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 453-458, March 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.168>
- [9] S. Uçar, & S. Karagöz, "Co-pyrolysis of pine nut shells with scrap tires", *Fuel*, vol. 137, pp. 85-93, December 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.082>
- [10] A. Hasan and I. Dincer, "Assessment of an Integrated Gasification Combined Cycle using waste tires for hydrogen and fresh water production", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, n.º 36, pp. 19730-19741, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.075>
- [11] K. Winternitz, M. Heggie and J. Baird, "Extended producer responsibility for waste tyres in the EU: Lessons learnt from three case studies – Belgium, Italy and the Netherlands", *Waste Management*, vol. 89, pp. 386-396, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.023>
- [12] G. J. Peláez Arroyave, S. M. Velásquez Restrepo y D. H. Giraldo Vásquez, "Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, n.º 2, pp. 27-50, 2017.
- [13] V. Ramírez H. y J. Antero A., "Evolución de la normativa ambiental colombiana en función de las tendencias mundiales de desarrollo sostenible", *Revista NOOS*, vol. 3, pp. 34-55, 2013.
- [14] L. Patiño y M. Rodríguez, "Llantas usadas: materia prima para pavimentos y múltiples ecoaplicaciones", *Revista Ontare*, n.º 5, pp. 1-34, 2018. <https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2004>
- [15] Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), "Colombia aprovecha más de 59 millones de llantas usadas", ANLA Noticias [En línea], 12 de marzo 2018. Disponible en: <https://www.anla.gov.co/noticias/1150-colombia-aprovecha-mas-de-59-millones-de-llantas-usadas>

- [16] E. E. Okoro, N. O. Erivona, S. E. Sanni, K. B. Orodu, and K. C. Igwilo, "Modification of waste tire pyrolytic oil as base fluid for synthetic lube oil blending and production: waste tire utilization approach", *J. Mater. Cycles and Waste Manag.*, n.º 2, pp. 2258-2269, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01018-1>
- [17] C. Vargas, "Factibilidad del aprovechamiento energético de neumáticos usados en la gran minería del cobre mediante pirólisis", *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica 2017*. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v18i36.12017>
- [18] G. Castro, "Materiales y compuestos para la industria del neumático", *Material Complementario. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Buenos Aires, diciembre 2008. Disponible en: https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Numatico.pdf*
- [19] P. T. Williams, "Pyrolysis of waste tyres: A review", *Waste Management*, vol. 33, n.º 8, pp. 1714-1728, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.003>
- [20] D. Landi, D., M. Marconi, M., I. Meo and M. Germani, "Reuse scenarios of tires textile fibers: An environmental evaluation", *Procedia Manufacturing*, vol. 21, n.º 2017, pp. 329-336, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.128>
- [21] V. Malijonyte, E. Dace, F. Romagnoli, I. Kliopova and M. Gedrovics, "A comparative life cycle assessment of energy recovery from end-of-life tires and selected solid waste", *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 257-264, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.064>
- [22] D. Czajczyńska, R. Krzyżyńska, H. Jouhara and N. Spencer, "Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review", *Energy*, vol. 134, pp. 1121-1131, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.042>
- [23] P. T. Williams and A. J. Brindle, "Aromatic chemicals from the catalytic pyrolysis of scrap tyres", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 67, n.º 1, pp. 143-164, 2003.
- [24] E. B. Machin, D. T. Pedroso and J. A. de Carvalho, "Technical assessment of discarded tires gasification as alternative technology for electricity generation", *Waste Management*, vol. 68, pp. 412-420, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.004>
- [25] P. Nowakowski and A. Król, "The influence of preliminary processing of end-of-life tires on transportation cost and vehicle exhausts emissions", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, n.º 35, pp. 1-14, 2021. doi: 10.1007/s11356-019-07421-y
- [26] E. Muzenda, "A Comparative Review of Waste Tyre Pyrolysis, Gasification and Liquefaction (PGL) Processes", *International Conference on Chemical Engineering & Advanced Computational Technologies (ICCEACT'2014)*, Nov. 24-25, 2014. Pretoria (South Africa).
- [27] U.S. Tire Manufacturers Association, "2017 U. S. Scrap Tire Management Summary", Washington, July 18, 2018.
- [28] J. Martínez, N. Puy, R. Murillo, T. García, M. V. Navarro and A. M. Mastral, "Waste tyre pyrolysis – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pp. 179-213, July 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.038>

- [29] N. Tangri y M. Wilson, "Análisis del riesgo de la gasificación y pirólisis", *Gaia*, n.º 18. <http://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificación-y-pirólisis-2017-ESP.pdf>
- [30] V. Belgiorno, G. de Feo, C. Della Rocca and R. M. A. Napoli, "Energy from gasification of solid wastes", *Waste Management*, vol. 23, n.º, pp. 1-15, 2003. Doi: 10.1016/S0956-053X(02)00149-6
- [31] A. Franco and N. Giannini, "Perspectives for the use of biomass as fuel in combined cycle power plants", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 44, Issue 2, pp. 163-177, February 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.07.005>
- [32] S. Porto, S. Casu, P. Iovane, A. Russo, M. Martino, A. Donatelli and S. Galvagno, "Optimizing H₂ Production from Waste Tires via Combined Steam Gasification and Catalytic Reforming", *Energy Fuels*, vol. 25, pp. 2232-2241, 2011.
- [33] A. Mohajerani, L. Burnett, J. V. Smith, S. Markovski, G. Rodwell, Md Tareq Rahman, H. Kurmus, M. Mirzababaei, A. Arulrajah, S. Horpibulsuk and F. Maghool, "Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review", *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 155, January 2020, 104679. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>
- [34] R. Escrivani Guedes, A. S. Luna and A. R. Torres, "Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 129, pp. 134-149, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.019>
- [35] R. D. Wankhade and T. Bhattacharya, "Pyrolysis oil an emerging alternate fuel for future (Review)", *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, vol. 6, n.º 6, pp. 239-243, 2017. Available: <http://www.phytojournal.com/archives/2017/vol6issue6/PartD/6-4-382-970.pdf>
- [36] A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading", *Biomass and Bioenergy*, vol. 38, pp. 68-94, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- [37] D. Chivatá Trompetero y C. C. Duarte Fuentes, "Diseño conceptual de una planta para el aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis", tesis de grado, Fundación Universidad de América, 2018.
- [38] M. Arabiourrutia, G. López, M. Artetxe, J. Álvarez, J. Bilbao and M. Olazar, "Waste tyre valorization by catalytic pyrolysis – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 129, May 2020, 109932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109932>
- [39] I. Hita, M. Arabiourrutia, M. Olazar, J. Bilbao, J. M. Arandes and P. Castaño, "Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 745-759, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.081>
- [40] A. Alsaleh and M. L. Sattler, "Waste Tire Pyrolysis: Influential Parameters and Product Properties", *Current Sustainable / Renewable Energy Reports*, n.º 1, pp. 129-135, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40518-014-0019-0>
- [41] F. Esaclona, S. Rodríguez, J. Antonio and A. Beatón, "Reactores en lecho fluidizado", *Tecnología Química*, vol. XXIX, pp. 205-212, 2009.
- [42] X. Dai, X. Yin, Ch. Wu and W. Zhang, "Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized-bed reactor", *Proceedings of the ICE – Energy*, vol. 26, n.º 4, pp. 385-399, 2001.
- [43] J. I. Osayi, S. Iyuke, M. O. Daramola, P. Osifo, I. J. Van Der Walt and S. E. Ogbeide, "Pyrolytic conversion of used tyres to liquid fuel: characterization and effect of operating conditions", *Journal of Material Cycles*

and *Waste Management*, vol. 20, n.º 2, pp. 1273-1285, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0690-5>

- [44] E. Aylón, A. Fernández-Colino, M. V. Navarro, R. Murillo, T. García and A. M. Mastral, "Waste Tire Pyrolysis : Comparison between Fixed Bed Reactor and Moving Bed Reactor", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 47, pp. 4029-4033, 2008.
- [45] S. Galvagno, S. Casu, T. Casabianca, A. Calabrese and G. Cornacchia, "Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results", *Waste Manag.*, vol. 22, n.º 8, pp. 917-923, 2002.
- [46] H. Hu, Y. Fang, H. Liu, R. Yu, G. Luo, W. Liu, A. Li, and H. Yao, "Chemosphere the fate of sulfur during rapid pyrolysis of scrap tires", *Chemosphere*, vol. 97, pp. 102-107, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.037>
- [47] H. Aydın and C. İllkılıçb, "Optimization of fuel production from waste vehicle tires by pyrolysis and resembling to diesel fuel by various desulfurization methods", *Fuel*, vol. 102, pp. 605-612, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.067>
- [48] Y. Kar, "Catalytic pyrolysis of car tire waste using expanded perlite", *Waste Management*, vol. 31, n.º 8, pp. 1772-1782, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.04.005>
- [49] J. Shah, M. R. Jan and F. Mabood, "Catalytic Pyrolysis of Waste Tyre Rubber into Hydrocarbons Via Base Catalysts", *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, vol. 27, n.º 2, pp. 103-109, 2008.
- [50] M. Rofiquel Islam, H. Haniu and M. Rafiquel Alam Beg, "Liquid fuels and chemicals from pyrolysis of motorcycle tire waste: Product yields, compositions and related properties", *Fuel*, vol. 87, nos. 13-14, pp. 3112-3122, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.036>
- [51] S. Chouaya, M. A. Abbassi, R. B. Younes and A. Zoulalian, "Scrap Tires Pyrolysis: Product Yields, Properties and Chemical Compositions of Pyrolytic Oil", *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 91, n.º 10, pp. 1603-1611, 2018. <https://doi.org/10.1134/S1070427218100063>
- [52] David, F. J. W. (2016). Evaluación de un reactor de lecho fluidizado en el proceso de pirólisis catalítica usando desecho de caucho de llanta. Universidad de Los Andes, 1-86.
- [53] Q. Xue, T. J. Heindel and R. O. Fox, "A CFD model for biomass fast pyrolysis in fluidized-bed reactors", *Chemical Engineering Science*, vol. 66, n.º 11, pp. 2440-2452, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.03.010>
- [54] P. T. Williams, S. Besler and D. T. Taylor, "The pyrolysis of scrap automotive and heating rate on product composition", *Fuel*, vol. 69, n.º 12, pp. 1474-1482, 1990.



Revisión sistemática de literatura sobre generación automática de ayudas en ejercicios de programación

Víctor Daniel Gil Vera¹

Recibido: 11 abril 2021. Aprobado: 9 mayo 2021.

Resumen: La programación de computadores es una de las habilidades más demandadas en el mercado laboral mundial y es un componente esencial del plan de estudios en cualquier programa universitario de ingeniería de sistemas. Una forma de ayudar a los estudiantes que tienen dificultades al momento de resolver los ejercicios es generar ayudas automáticas, las cuales consisten en suministrar sugerencias personalizadas durante el proceso de solución. Uno de los principales desafíos asociados con la generación de ayudas para la programación es la modelación automática de los pasos de la solución a partir de un gran número de soluciones correctas, debido a la diversidad de posibles soluciones que un estudiante puede escribir. El objetivo de este trabajo fue presentar una revisión sistemática de literatura sobre los algoritmos existentes para generar ayudas automáticas a partir de un conjunto de soluciones correctas. Se concluye que, a pesar de que diferentes investigaciones han demostrado la efectividad de este tipo de ayudas, su empleabilidad de manera masiva apenas comienza a implementarse en universidades de América Latina.

Palabras clave: Árboles de Sintaxis Abstracta, Inteligencia artificial, Programación de Computadores,

Sistemas Tutoriados Inteligentes.

Abstract: Worldwide, computer programming is one of the most demanded skills in the labor market and is an essential component of the curriculum in any university systems engineering program. One way to help students who have difficulties in solving exercises is the generation of automatic hints, which consist of providing personalized hints during the solution process. One of the main challenges associated with the generation of programming hints is the automatic modeling of the solution steps from a large number of correct solutions, due to the diversity of possible solutions that a student can write. The objective of this paper was to present a systematic literature review of existing algorithms for generating automatic hints from a set of correct solutions. This paper concludes that, in spite of the fact that different researches have demonstrated the effectiveness of this type of hints, their massive employability is just beginning to be implemented in Latin American universities.

Keywords: Abstract Syntax Trees, Artificial Intelligence, Computer programming, Intelligent Tutorial Systems.

¹ Víctor Daniel Gil Vera. Doctor en Ingeniería de Sistemas. Universidad Católica Luis Amigó. Colombia, Medellín. victor.gilve@amigo.edu.co. ORCID:0000-0003-3895-4822.

Introducción

La retroalimentación es un componente esencial del proceso de aprendizaje en cualquier área de conocimiento. El tamaño de las clases en las ciencias de la computación aumenta rápida y constantemente, lo cual hace difícil brindar retroalimentación a un gran número de estudiantes al mismo tiempo. A pesar de que los Sistemas Tutoriales Inteligentes (STI) proporcionan comentarios personalizados automáticamente, su construcción requiere tiempo y conocimiento experto, especialmente para generar sugerencias a los estudiantes que tienen dificultades en la resolución de un ejercicio [1]. Los enfoques basados en datos se pueden utilizar para proporcionar sugerencias personalizadas de forma automática y a escala mediante el uso de soluciones correctas. Este trabajo presenta los resultados de una revisión sistemática de literatura (RSL), la cual tuvo como objetivo dar respuesta a preguntas de investigación a partir de los resultados publicados en investigaciones científicas. Para su elaboración, se han seguido las directrices de la declaración PRISMA [2], [3], en la cual se establecen los lineamientos para hacer una correcta RSL. Se realizó una búsqueda en las bases de datos científicas Scopus y WoS, se consideraron todas las publicaciones disponibles hasta octubre de 2021 con el objetivo de responder las siguientes preguntas de investigación:

- P1. ¿Cuáles son los enfoques actuales de la generación de ayudas basadas en datos para la escritura de algoritmos?
- P2. ¿Cuáles son los principales algoritmos para la generación de ayudas basadas en datos?
- P3. ¿Cuáles son las brechas de conocimiento de la generación de ayudas basadas en datos para la escritura de algoritmos?
- P4. ¿Qué STI existen en la actualidad para la enseñanza de la programación de computadores?

Las palabras claves empleadas para la selección de los documentos fueron: "data guides", "computer", "science", "education", "programming", "ITS" e "informatics".

Se empleó la siguiente cadena de búsqueda que incluía sinónimos comunes para la educación en programación y la tutoría inteligente:

TITLE-ABS-KEY ("computer science education" OR "data-driven" OR "hint" OR "next-step" OR "programming" OR "software engineering education" OR "introductory computer" OR "introductory programming" OR "teach-programming" OR "learn-programming" OR "novice-programming" OR "coding education" OR "introductory computer science") AND ("intelligent tutor*" OR "adaptive tutor*" OR "cognitive tutor*" OR "smart tutor")

Los criterios de inclusión y exclusión se diseñaron para extraer solamente los artículos que estuvieran relacionados con las preguntas de investigación planteadas. Para determinar si los artículos cumplían con los criterios de inclusión o exclusión, se leyeron los resúmenes de cada uno y se descartaron los que no. Los criterios de inclusión que se emplearon para seleccionar los artículos considerados fueron:

- Criterio 1: emplearon algoritmos para la generación de ayudas automáticas y fueron utilizados por estudiantes de cursos de programación de computadores.
- Criterio 2: los algoritmos se emplearon para la enseñanza de un lenguaje de programación que tiene estructuras de control condicionales e iterativas.
- Criterio 3: los algoritmos tomaban un conjunto de datos de entrenamiento de trazas de soluciones correctas y un conjunto de solicitudes de ayudas como entradas y devolvían un conjunto de sugerencias/pistas o ayudas.

Para descartar los artículos de la búsqueda primaria, los criterios de exclusión fueron:

- Criterio 1: no se evidenció que los algoritmos hayan sido empleados por estudiantes que aprenden programación de computadores.

- Criterio 2: los algoritmos no fueron validados.
- Criterio 3: los algoritmos no servían para generar ayudas automáticas.

De la RSL se identificó que EE. UU., Reino Unido y Australia son los tres países pioneros en esta área de conocimiento, todas las universidades de América Latina están llamadas a emplear este tipo de ayudas, ya que son grandes los beneficios que genera su uso en cursos universitarios de programación de computadores. Se concluye que la generación de ayudas automáticas basadas en datos es de gran utilidad para los docentes de esta área de conocimiento, sobre todo cuando es alto el número de estudiantes matriculados, ya que es complejo brindar asesoría personalizada a cada uno de manera independiente. A pesar de que los algoritmos existentes en la actualidad para generar este tipo de ayudas han demostrado tener un grado alto de efectividad, uno de los puntos débiles es la generación de sugerencias que no tienen relación con lo que están desarrollando los estudiantes, lo que los desmotiva a solicitar las ayudas. Esta problemática es una de las principales brechas de conocimiento que puede abordarse en futuras investigaciones.

Marco Teórico

Las habilidades de programación se están convirtiendo en una competencia central para casi todas las profesiones. Por lo anterior, la educación en programación (*JavaScript, Python, Java, TypeScript, C#, PhP, C++, C, Shell, Ruby, R, VBA, Swift, Kotlin*) cada vez más se integra en los planes de estudio de los programas de educación superior, especialmente en los relacionados con la ingeniería [4]. Las dificultades con el aprendizaje de la programación son una de las principales barreras que tienen los estudiantes para adelantar estudios en informática y en otras disciplinas relacionadas, lo cual obedece principalmente a su incapacidad para resolver los ejercicios, situación que puede desmotivarlos a avanzar cuando no pueden obtener ayuda de inmediato por parte del docente o tutor.

Para abordar esta problemática, se han propuesto varios enfoques para ayudar a los estudiantes a

aprender a resolver ejercicios de programación. Tradicionalmente, la mejor opción en la enseñanza de la programación ha sido la tutoría "cara a cara" y "uno a uno". Sin embargo, los tutores humanos no siempre están disponibles y es complejo brindar asesoría personalizada a un número grande de estudiantes. La Tutoría Basada en Datos (TBD) es un subcampo de la tutoría inteligente (TI) que basa la toma de decisiones en el trabajo de antiguos estudiantes, en lugar de una base de conocimientos construida por expertos o un gráfico con todas las rutas posibles. El primer avance de la TBD con un enfoque en la generación de ayudas fue iniciado por la "Fábrica de Ayudas", un sistema para tutores lógicos que utiliza los procesos de decisión de Markov para integrar las rutas de acción de los estudiantes en un solo gráfico [5].

Las soluciones correctas que han realizado los estudiantes se pueden utilizar para proporcionar sugerencias personalizadas de forma automática. En lugar de construir una gran base de conocimiento de tutores expertos (BC), el enfoque basado en datos utiliza una gran cantidad de soluciones estudiantiles correctas. En resumen, la TBD emplea las soluciones correctas de los estudiantes para construir un espacio de solución que contenga todas las soluciones que los estudiantes han creado en semestres anteriores en un curso de programación, de manera tal que se puedan establecer diferentes caminos posibles para corregir intentos de los estudiantes de manera automática. En el campo de la programación, existen algoritmos que generan automáticamente ayudas que les sugieren a los estudiantes cómo deben editar su código para resolver errores y progresar. Se destacan los algoritmos: *TR-ER, CHF, NSNLS, CTD e ITAP*, los cuales han demostrado mejorar el aprendizaje de los estudiantes en esta área de conocimiento [4].

Planteamiento del Problema

Objetivo general

Realizar una RSL enfocada a determinar el estado actual de conocimiento sobre la generación de ayudas automáticas basadas en datos en cursos de programación de computadores.

Objetivos específicos

- Identificar los enfoques actuales de la generación de ayudas basadas en datos para la escritura de algoritmos.
- Identificar los principales algoritmos para la generación de ayudas basadas en datos.
- Identificar las brechas de conocimiento de la generación de ayudas basadas en datos para la escritura de algoritmos.
- Identificar los STI existentes en la actualidad para la enseñanza de la programación de computadores.

Pregunta de investigación

P1. ¿Cuál es el estado actual de conocimiento sobre la generación de ayudas automáticas basadas en datos en cursos de programación de computadores?

Justificación

Es necesario realizar una revisión exhaustiva de literatura enfocada a determinar el estado actual de conocimiento sobre la generación de ayudas automáticas basadas en datos en cursos de programación de computadores, ya que este tipo de cursos en la mayoría de universidades tienen la tendencia a crecer permanentemente, lo que significa un incremento constante en el número de estudiantes matriculados y un enorme desafío para los docentes, sobre todo al momento de atender las dudas e inquietudes que presenten los estudiantes cuando deben resolver los ejercicios [37]. Estas ayudas permiten mantener la motivación de los estudiantes, ya que de manera más fácil y eficiente obtienen sugerencias cuando se les presentan dificultades, sin tener que estar supeditados a la orientación del docente o tutor.

Metodología

Las RSL se caracterizan por estar enfocadas en responder preguntas de investigación claramente definidas y por emplear métodos sistemáticos

explícitos para identificar, seleccionar y evaluar críticamente la investigación relevante de los estudios publicados con anterioridad relacionados con un tema por investigar; son una forma metódica para identificar, evaluar e interpretar los estudios empíricos disponibles sobre un tema, pregunta de investigación o fenómeno de interés [6].

La declaración PRISMA es un conjunto mínimo de elementos basados en evidencia científica para garantizar la calidad de las revisiones sistemáticas y meta-análisis [7], consta de una lista de verificación de 27 elementos y un diagrama de flujo de cuatro fases. La lista de verificación incluye elementos que se consideran esenciales para la presentación de informes transparentes de una revisión sistemática [8]. Esta declaración es útil para la evaluación crítica de revisiones sistemáticas publicadas previamente [9].

Aplicando la cadena de búsqueda presentada anteriormente, se obtuvieron 23 resultados en WoS y 26 en Scopus, para un total de 49 resultados. También se identificaron 3 publicaciones divulgativas relacionadas con la temática en otro tipo de fuentes. Tras eliminar seis duplicados entre las dos bases de datos, quedaron 46 artículos, a los cuales se les hizo el cribado con base en la lectura de los títulos y resúmenes, a partir de esta lectura se descartaron 7 artículos por no tener relación con cursos de programación.

De los 39 artículos que quedaron, y según los criterios de inclusión y exclusión mencionados más arriba, se descartaron 9 artículos porque: no existía evidencia de que los algoritmos que emplearon hayan sido utilizados por estudiantes que aprenden programación ($n=2$); eran algoritmos que no se habían validado ($n=3$), o no servían para generar ayudas automáticas ($n=4$). Finalmente, 30 artículos cumplieron los criterios de inclusión y se seleccionaron para llevar a cabo la revisión sistemática. La Figura 1 resume el proceso mediante un diagrama de Flujo PRISMA en cuatro niveles.

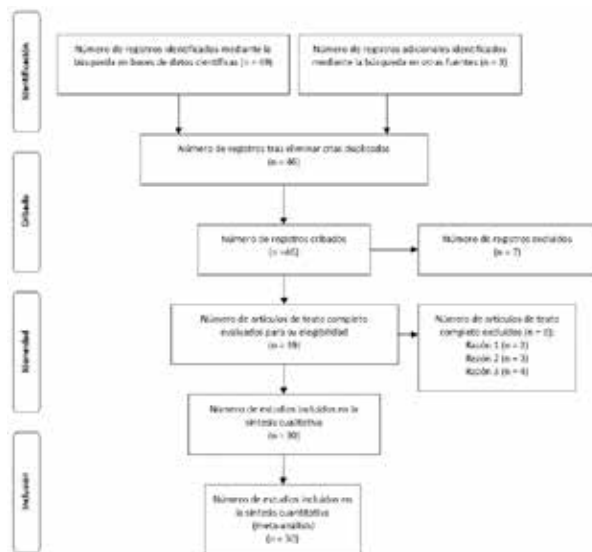


Figura 1. Diagrama de flujo en cuatro niveles.

Fuente: elaboración propia.

Se debe señalar que se verificó el cumplimiento de los 27 ítems de chequeo que establece la declaración: Título, Resumen estructurado, Introducción (Justificación y Objetivos), Métodos (Protocolo y Registro, Criterios de elegibilidad, Fuentes de información, Búsqueda, Selección de los estudios, Proceso de recopilación de datos, Lista de datos, Riesgo de sesgo en los estudios individuales, Medidas de resumen, Síntesis de resultados, Riesgo de sesgo entre los estudios, Análisis adicionales), Resultados (Selección de estudios, Características de los estudios, Riesgo de sesgo en los estudios, Resultados de los estudios individuales, Síntesis de los resultados, Riesgo de sesgo entre los estudios, Análisis adicionales), Discusión (Resumen de la evidencia, Limitaciones, Conclusiones) y Financiación.

Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados encontrados en la revisión del estado del arte en cada una de las preguntas de investigación:

P1. ¿Cuáles son los enfoques actuales de la generación de sugerencias basadas en datos para la escritura de algoritmos?

A continuación, se detalla cada uno de los cinco enfoques existentes, los cuales se basan

en la generación de sugerencias centradas en correcciones y en estilos de código [10], [11].

Enfoque de síntesis del programa

En [12] emplearon modelos de error y bocetos de programas para encontrar una asignación de estudiantes a programas actuales. En lugar de confiar en un conjunto predefinido de soluciones, emplearon la síntesis del programa para generar una nueva solución a partir del programa actual del estudiante. Sin embargo, de acuerdo con [13], este enfoque requiere expertos que definan un modelo de error específico para cada ejercicio de programación.

En la investigación desarrollada en [14], se basaron en el análisis de las ediciones de una sola línea realizadas por estudiantes, las cuales se emplearon para intentar encontrar una solución correcta. Esas ediciones se utilizaron como fuente para proporcionar sugerencias a los estudiantes. Sin embargo, su aplicación requiere un conjunto de casos de prueba para evaluar los códigos generados [15]. En [16], todas las expresiones comunes de los códigos de los estudiantes se emplearon para crear una base de datos de códigos fuente la cual fue utilizada para la generación de ayudas. Esta técnica tiene un gran potencial para apoyar soluciones nuevas, pero falla cuando el código del estudiante que solicita la ayuda difiere de las soluciones de la base de datos.

En [17] se adoptó un enfoque basado en ejemplos para aprender las correcciones de código y se emplearon transformaciones de árbol de sintaxis abstracta (AST) a partir de pares de envíos de estudiantes incorrectos y correctos. A pesar de que este enfoque requiere mucho menos esfuerzo, no genera sugerencias cuando el código del estudiante que solicita la ayuda se aleja de una solución correcta [14]. Por su parte, en [18] introdujeron un enfoque de iniciativa mixta que combina la experiencia del profesorado con técnicas de síntesis de programas basadas en datos. En esta investigación se demostró cómo el análisis y la síntesis de programas pueden usarse como ayuda para que un maestro pueda escalar la retroalimentación basado en su profundo conocimiento. Sin embargo, se requiere que los

docentes revisen y escriban sugerencias para códigos incorrectos de los estudiantes [15]. También exploraron un espacio de diseño de ayudas que puede generarse automáticamente a partir de las transformaciones de código aprendidas de la síntesis del programa. En esta investigación, las estrategias que emplea un docente humano fueron adaptadas a sugerencias automatizadas y se identificaron cinco tipos de ayudas para los docentes que pueden generarse por síntesis del programa: transformaciones, ubicaciones, datos, comportamiento y ejemplos [15].

En [14], desarrollaron un sistema robusto de generación de ayudas que extiende la cobertura del enfoque basado en síntesis del programa empleado, y un verificador de sintaxis que detecta errores comunes de sintaxis en subexpresiones individuales, para guiar a los estudiantes a soluciones parciales que puedan evaluarse para la exactitud semántica. El enfoque basado en la síntesis del programa se utiliza para generar ayudas para programas casi correctos, si el enfoque falla, el analizador de casos detecta ramas del programa que faltan para guiar a los estudiantes a soluciones parciales con estructuras razonables.

Enfoque basado en agrupaciones

En [16] emplearon la agrupación para inferir grupos de programas de computadora y seleccionar la solución de muestra más similar para generar ayudas. Cuando el estudiante requiere una sugerencia sobre cómo cambiar su código para acercarse a una solución correcta, se compara con un ejemplo similar del grupo, y las diferencias entre su código y el código de ejemplo se comparan para ayudar al estudiante a mejorar su propia solución. El desafío con este enfoque es la derivación de pasos de solución a partir de soluciones completas de muestra para reducir el esfuerzo en la modelación de ejemplos.

En [19] introdujeron una representación alternativa de programas de computadora para la clasificación y detección de errores en STI, es decir, trazas de ejecución. La representación de traza se puede aplicar para identificar programas erróneos, lo que permite que un STI detecte si un estudiante ha terminado una tarea o aún necesita continuar.

Sin embargo, concluyeron que se requiere una representación sintáctica cuando un programa aún no compila o se bloquea.

En esta investigación también propusieron una técnica semisupervisada para generar retroalimentaciones. Esta técnica agrupa las soluciones basadas en estrategias. Los docentes etiquetan manualmente en cada grupo un intento correcto y validan formalmente las soluciones incorrectas contra la correcta. En [20] se presentó una técnica novedosa para agrupar y reparar ejercicios de programación. Los intentos correctos se agrupan empleando variables para diferentes entradas. Finalmente, se selecciona un intento de cada grupo como solución de referencia y se hacen las comparaciones de código. Un intento incorrecto se compara con cada intento correcto del conjunto de solución empleando rastros de variables para calcular reparaciones. Esta técnica proporciona comentarios personalizados utilizando la solución de referencia con el menor número de variables. Sin embargo, el problema de esta técnica es que requiere entradas que no son fáciles de proporcionar para activar todos los errores posibles [21].

Enfoque de recomendación

En [22] se representa un marco que puede ayudar a los estudiantes en el proceso de codificación, recomendando ediciones de códigos específicos relevantes para los códigos de solución. Se emplea el algoritmo *pq-Gram* para reducir las distancias entre los árboles de sintaxis abstracta (AST) y se compara la solución del estudiante con la solución más cercana en una base de datos de soluciones correctas para identificar el conjunto de inserciones, eliminaciones y reetiquetado que transformará directamente el AST del estudiante en una solución correcta. La desventaja de este método es que requiere obligatoriamente la generación de AST, la similitud semántica entre los códigos y las pruebas de usabilidad. En [23] se presenta un marco denominado Sistema de recomendación de ejemplo (ERS), que se basa en EBL y que utiliza algoritmos de minería de vanguardia para recomendar una lista enfocada, organizada y personalizada de ejemplos resueltos con el objetivo general de aumentar la probabilidad

de éxito de los estudiantes. La limitación de este sistema es la construcción manual de expresiones regulares (RE) por expertos.

Enfoque de razonamiento basado en casos

En [24] emplearon un enfoque de razonamiento basado en casos (CBR), al que llaman Recuperación de Árbol de Sintaxis Abstracta (ASTR), para extraer datos de soluciones anteriores contenidas en un gran conjunto de datos. Este sistema no requiere conocimiento previo del problema que se está resolviendo. Emplea CBR y la gramática del lenguaje de programación para recuperar una solución previa con alta similitud. Sin embargo, el sistema no contiene información sobre el problema de programación y no funciona para el lenguaje Python.

Sugerencias basadas en la "Fábrica de Ayudas"

Esta técnica representa las interacciones del estudiante con el docente en forma de gráfico. Cuando el estudiante solicita la ayuda y su código coincide con alguna parte del gráfico, se genera una ayuda que finalmente conduce a una solución [25]. En [26] la emplearon para generar automáticamente ayudas en un curso de lógica proposicional. Este enfoque utiliza los datos del estudiante para construir un proceso de decisión de Markov, opera representando el problema en un gráfico con nodos, donde cada nodo representa el estado actual del estudiante en la resolución del problema y cada línea, las acciones del estudiante. Una solución se representa como una ruta desde el estado inicial a un estado objetivo. Este enfoque se ha extendido para trabajar en otros dominios más estrechamente relacionados con la programación. En [27] lo emplearon en un tutor llamado *iList*, que ayuda a los estudiantes a aprender listas vinculadas, y en [28] lo emplearon para representar estados de los programas que desarrollaban los estudiantes. En [29] señalaron que múltiples soluciones que existen para estudiantes deberían estar disponibles, debido al riesgo de que no se reconozca una alternativa específica para resolver el ejercicio. En [1] propusieron un enfoque basado en datos para crear un espacio de solución consistente con todas las rutas posibles desde el enunciado del problema hasta una solución correcta. Estos investigadores desarrollaron ITAP, un asistente de

enseñanza inteligente para programación, el cual permite generar ayudas para estados nunca antes considerados.

Según [22], un obstáculo importante de las representaciones con AST es la pérdida de información de comportamiento. En [26], presentaron un nuevo algoritmo basado en datos llamado *Contextual Tree Decomposition* (CTD), basado en "Fábrica de Ayudas", para generar ayudas para estos programas. En [29] desarrollaron *iSnap*, una extensión del entorno de programación *Snap* que agrega características clave de los STI, incluido el registro detallado y sugerencias generadas automáticamente.

La Tabla 1 presenta las 10 publicaciones con la mayor cantidad de citas en orden descendente y la principal contribución de cada una.

Tabla 1. Publicaciones más citadas y su contribución.

Autores y año	Citas	Contribución
[1]	87	La abstracción de estados, la construcción de rutas y la cosificación de ayudas se pueden emplear de diferentes maneras para brindar a los estudiantes diferentes tipos de retroalimentación; existe un gran potencial en el uso de funciones para identificar códigos ineficientes y mejorar su estilo y eficiencia.
[26]	67	Los entornos de programación diseñados intencionalmente para ayudar a los estudiantes principiantes se han vuelto cada vez más populares; a pesar de que estos entornos ofrezcan herramientas para reducir errores de sintaxis, la mayoría de ellos ofrecen poca ayuda a los estudiantes que se atascan y necesitan apoyo de expertos.
[18]	50	Las funciones de autocorrección de sintaxis de código tienen la capacidad de identificar errores cometidos por los estudiantes, pero carecen del conocimiento experto de un docente, esto conlleva la generación de correcciones funcionalmente correctas, pero estilísticamente pobres.

Autores y año	Citas	Contribución
[30]	28	Los STI han demostrado tener éxito en el dominio de la programación al proporcionar sugerencias y comentarios personalizados a los estudiantes; sin embargo, muchos entornos de programación populares para principiantes carecen de estas funciones inteligentes.
[28]	27	La generación de ayudas automáticas es una tarea que requiere mucho tiempo para poder ser implementadas satisfactoriamente en STI; sin embargo, las técnicas de minería de datos educativos (EDM) y de aprendizaje automático (ML) pueden facilitar esta tarea.
[31]	25	La calidad de las primeras ayudas o sugerencias suministradas a los estudiantes en la resolución de un ejercicio de programación los motiva o desmotiva a seguirlas solicitando, razón por la cual se deben presentar ayudas útiles que tengan relación con lo que han realizado los estudiantes para que puedan culminar los ejercicios de manera satisfactoria.
[32]	24	A medida que más entornos de programación agregan funciones de registro y los datos de programación se vuelven más accesibles, es esencial tener en cuenta cómo se comparten y usan estos datos. Para generar ayudas automáticas es importante identificar qué datos son importantes recopilar, dónde se pueden recopilar y cómo manejar la privacidad y el anonimato de los estudiantes.
[22]	22	Para resolver problemas que puedan presentar los estudiantes al momento de resolver un ejercicio de programación, se pueden emplear conjuntos de ediciones textuales de estudiantes de cursos pasados con el fin de sintetizar nuevos códigos aplicando secuencias de ediciones hasta identificar una solución al problema.

Autores y año	Citas	Contribución
[33]	19	Para generar comentarios inteligentes en forma de ayudas personalizadas, se pueden emplear métodos basados en el uso de AST que representen los códigos de lo que llevan desarrollado los estudiantes y los comparen con otros AST culminados de manera satisfactoria por otros estudiantes.
[34]	7	Los STI basados en datos aprenden a proporcionar comentarios basados en el comportamiento de estudiantes de cursos pasados, lo que reduce el esfuerzo requerido para su desarrollo. Un obstáculo importante para la aplicación de métodos basados en datos en el dominio de la programación es la falta de acciones observables significativas para describir el proceso de resolución de problemas de los estudiantes.

Fuente: elaboración propia.

P2. ¿Cuáles son los principales algoritmos para la generación de ayudas basadas en datos?

Existen seis algoritmos de generación de ayudas automáticas basadas en datos: *TR-ER*, *CHF*, *NSNLS*, *CTD*, *SourceCheck* e *ITAP*. Cada algoritmo toma un conjunto de datos de entrenamiento de trazas de soluciones correctas y un conjunto de solicitudes de sugerencias como entradas, y devuelve un conjunto de correcciones correctas (sugerencias de respuesta). Cada ayuda generada se representa como un estado: el nuevo estado de código que resulta de aplicar la edición recomendada al estado de código actual del estudiante.

La mayoría de estos algoritmos funcionan en dos fases: primero identifican un estado de código objetivo (a menudo una solución correcta) en el conjunto de datos de capacitación, luego recomiendan ediciones para convertir el código del estudiante a este estado objetivo. En la Tabla 2 se describe cada uno de ellos.

Tabla 2. Descripción de los algoritmos.

Algoritmo	Descripción
TR-ER	Este algoritmo define el estado objetivo como la solución correcta más cercana al código actual del estudiante usando la fórmula de distancia pq-Gram para Árboles de Sintaxis Abstracta (AST) [35]; el cálculo de esta distancia implica representar un AST como un conjunto múltiple de todos sus subárboles. El algoritmo sugiere ayudas para insertar, eliminar o reemplazar código basado en los pq-Grams extras o faltantes en el código del estudiante [22].
CHF	Este algoritmo define el estado objetivo como el paso que un estudiante de cursos pasados haya realizado de manera acertada. Primero, calcula la distancia entre el rastro del estudiante, incluido el historial del código y los rastros de todos los estudiantes en el conjunto de datos de soluciones correctas que se acercaron a la solución, utilizando una deformación dinámica del tiempo (DDT). Segundo, define el estado objetivo basado en predicciones de cómo estos estudiantes procedieron en la situación del estudiante que está solicitando la ayuda, utilizando regresión del proceso gaussiano. Por último, identifica las ediciones de los AST que acercan más al estudiante al estado objetivo, utilizando una gramática de árbol para seleccionar solo ediciones válidas [35]
CTD	Este algoritmo, en lugar de seleccionar un único estado objetivo del conjunto de datos de solución, como hace la "Fábrica de Ayudas", descompone los AST de los estudiantes en subárboles y hace coincidir piezas más pequeñas de código con los de otros estudiantes y utiliza estas coincidencias para generar ayudas contextualizadas en cada subárbol [30].
Source Check	Este algoritmo selecciona un único estado objetivo, definido como la solución presentada más cercana al código actual del estudiante, lo calcula utilizando una métrica de distancia específica del código e incorpora elementos de código comunes de dos AST. El algoritmo genera sugerencias en cada nivel del AST basándose en las diferencias entre los nodos de dos AST [36].

Algoritmo	Descripción
ITAP	Este algoritmo genera ayudas mediante un proceso de cinco pasos: primero, elimina las variaciones sintácticas; segundo, identifica la solución correcta más cercana al código actual del estudiante; tercero, aplica la construcción de rutas para identificar cualquier solución correcta más cercana y no descubierta; cuarto, identifica un estado objetivo en la ruta hacia la solución óptima, y quinto, extrae la edición más cercana al nodo raíz del AST y la presenta al estudiante como una ayuda [1].
NSNLS	Este algoritmo determina el estado objetivo del código actual del estudiante que solicita la ayuda a partir de la solución del conjunto total de soluciones correctas que más se asemeja a lo que lleva desarrollado el estudiante, y genera como sugerencia el paso siguiente que se haya realizado en la solución identificada como la más similar del conjunto total de soluciones [22].

Fuente: elaboración propia.

P3. ¿Cuáles son las brechas de conocimiento de la generación de ayudas basadas en datos para STI en programación?

En el contexto de los STI basados en datos para la escritura de código, a pesar de los esfuerzos de investigación en los últimos años, la generación de ayudas automáticas sigue teniendo problemas. A partir de la revisión del estado del arte, las brechas que se identificaron fueron:

Modelado automático de los pasos de la solución de ejercicios a partir de soluciones correctas:

ninguno de los STI para escritura de código modela automáticamente los pasos de la solución correcta de un conjunto de soluciones correctas de un ejercicio de programación. Cómo modelar automáticamente los pasos de la solución de una gran cantidad de soluciones correctas de un ejercicio de programación es un problema no resuelto.

Lenguaje de programación: en el contexto de los STI basados en datos para la escritura de código, se puede ver que, aunque los STI que se han desarrollado previamente cubren muchos dominios, ninguno de ellos enseña programación en lenguaje C/C++.

Ejercicios de programación soportados por la escritura de códigos de STI basados en datos:

es importante que un STI basado en datos para la escritura de código proporcione una colección de ejercicios de programación. Sin embargo, estos ejercicios de programación generalmente se almacenan en sistemas privados de las universidades.

Representación del código actual del estudiante:

en el contexto de la “Fábrica de Ayudas”, para poder generar automáticamente sugerencias, el estado actual de avance en la resolución de un problema se realiza a través de la captura del código actual del estudiante y no se considera su historial.

Similitud semántica: no han resuelto el problema de cómo extraer soluciones distintas de un gran conjunto de datos de manera eficiente y precisa.

P4. ¿Qué STI existen en la actualidad para la enseñanza de la programación de computadores?

De la búsqueda de STI para la programación se identificaron las siguientes variables: nombre, lenguaje de programación y características adaptativas primarias. Los criterios de presencia o ausencia se detallan a continuación:

- I) Preguntas que los estudiantes responden dentro del STI
- II) Creación de planes de programa por parte de los estudiantes con el STI
- III) Generación de planes visuales de programas de enseñanza utilizados como recursos
- IV) Lecciones sobre conceptos de programación
- V) Materiales de referencia
- VI) Soluciones trabajadas suministradas como un recurso de instrucción

La Tabla 3 presenta el resumen de los STI que fueron encontrados en la revisión.

Tabla 3. STI para la enseñanza de la programación

Nombre	Lenguaje	Característica adaptativa	I II III IV V VI
PROUST	Pascal	Retroalimentación	I, II, III, IV
LISP Tutor	Lisp	Retroalimentación	I, II, IV, V
ITEM/IP	Turingal	Retroalimentación y navegación	IV, V, VI
C-Tutor	C++	Retroalimentación	I, II, III, VI
ELM-ART	Lisp	Retroalimentación y navegación	V, VI
Scope Tutor	Pascal	Retroalimentación	I, II, III
ILMDA	Java	Retroalimentación	I, II, III, IV
AtoL	Java	Retroalimentación	V, VI
CIMEL ITS	Java	Retroalimentación y navegación	IV, V, VI
CPP-Tutor	C++	Retroalimentación y navegación	I, II, III
J-LATTE	Java	Retroalimentación	I, II, III, IV
ChiQat	No especifica	Retroalimentación	I, II, III
Ask-Elle	Haskell	Retroalimentación	I, II
ITAP	Python	Retroalimentación	IV, V, VI

Fuente: elaboración propia

En resumen, hay dos líneas de investigación propuestas para generar sugerencias basadas en datos en STI para la escritura de código: programas basados en síntesis y sugerencia basada en "Fábrica de Ayudas". Sin embargo, hay dos inconvenientes principales de los enfoques basados en síntesis: el primero hace referencia a que un instructor debe proporcionar manualmente modelos de error para cada problema, el segundo, a la escalabilidad, especialmente con programas grandes. En términos de conocimiento experto, los enfoques basados en "Fábrica de Ayudas" son adecuados para generar ayudas en STI para la escritura de códigos. Estos enfoques solo requieren dos conocimientos expertos para ejecutarse de forma independiente. Los STI existentes para la escritura de códigos que se basan únicamente en la generación de sugerencias de datos difieren entre sí en los siguientes aspectos: la representación del código actual del estudiante, la extracción de soluciones diferentes de un ejercicio de programación, el nivel de granularidad del código utilizado, el modelado automático de los pasos de la solución y el lenguaje de programación.

Conclusiones

En este trabajo se presentan los resultados de una RSL en la cual se identificaron los problemas, retos, vacíos y brechas en el área de la generación automática de ayudas de ejercicios de programación. Si se considera que el número de estudiantes en este tipo de cursos (Massive Open Online Courses —MOOC—) se incrementa constantemente, estos enfoques son de gran utilidad porque facilitan el proceso de retroalimentación y evaluación a los docentes de estos cursos. A pesar de que las limitaciones y desventajas de estos enfoques pueden desmotivar a los estudiantes, son más las ventajas y beneficios que generan, razón por la cual todos los programas de ingeniería que dicten cursos de programación en universidades de América Latina están llamados a implementarlos.

La mayoría de programas y plataformas en línea para la enseñanza de la programación (Google Colaboratory, SoloLearn, Learn Python, Programiz, Programming Hub, Enki, DataCamp, Mimo, etc.)

tienen la capacidad de identificar errores de sintaxis en los códigos que desarrollan los estudiantes, y a pesar de que esta información es de gran importancia, en muchos casos no es suficiente, sobre todo cuando los estudiantes se enfrentan a ejercicios con un alto nivel de complejidad, lo que los obliga a consultar ayudas en repositorios como StackOverflow, GitHub, Medium, GeeksforGeeks, entre otros. Las ayudas que se almacenan en estos repositorios son de gran utilidad, sin embargo, los estudiantes pueden verse tentados a copiar código de ellos y pegarlo, lo que perjudica la adquisición y desarrollo de competencias de aprendizaje de manera autónoma.

Trabajo futuro

Futuras investigaciones pueden enfocarse en desarrollar aplicativos para generar ayudas automáticas en MOOC que se dictan en sistemas de gestión de aprendizaje como Moodle, Canvas, Chamilo, etc.

Financiación

Este trabajo fue patrocinado por la Universidad Católica Luis Amigó y fue desarrollado dentro del proyecto de investigación titulado: "Generación de ayudas automáticas en cursos de programación a partir de soluciones correctas" del grupo de investigación SISCO.

Referencias

- [1] K. Rivers and K. R. Koedinger, "Data-driven hint generation in vast solution spaces: a self-improving python programming tutor," *Int. J. Artif. Intell. Educ.*, vol. 27, n.º 1, pp. 37-64, 2017.
- [2] K. Knobloch, U. Yoon, and P. M. Vogt, "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses (PRISMA) statement and publication bias," *J. Cranio-Maxillofacial Surg.*, vol. 39, n.º 2, pp. 91-92, 2011.
- [3] G. Urrutia y X. Bonfill, "La Declaración PRISMA: un paso adelante en la mejora de

las publicaciones de la Revista Española de Salud Pública," *Rev. Esp. Salud Pública*, vol. 87, n.º 2, pp. 99-102, 2013.

- [4] N.-T. Le, "Analysis techniques for feedback-based educational systems for programming," in *Advanced Computational Methods for Knowledge Engineering*, Springer, T. B. Nguyen, T. van Do, H. A. Le Thi, N. T. Nguyen, Eds. Proceedings of the 4th International Conference on Computer Science, Applied Mathematics and Applications, ICCSAMA, 2-3 May, 2016, Vienna, Austria, pp. 141-152.
- [5] T. Barnes and J. Stamper, "Toward automatic hint generation for logic proof tutoring using historical student data," in *International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, 2008, pp. 373-382.
- [6] B. Kitchenham, O. Pearl Brereton, D. Budgen, M. Turner, J. Bailey, and S. Linkman, "Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 51, n.º 1, pp. 7-15, Jan. 2009.
- [7] A. Liberati et al., "The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration," *J. Clin. Epidemiol.*, vol. 62, n.º 10, pp. e1-e34, 2009.
- [8] J. Oláh, E. Krisán, A. Kiss, Z. Lakner, and J. Popp, "PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews of the Bioethanol Sector," *Energies*, vol. 13, n.º 9, p. 2323, 2020.
- [9] J. P. M. Peters, L. Hooft, W. Grolman, and I. Stegeman, "Reporting quality of otorhinolaryngologic articles based on the PRISMA statement," *PLoS One*, vol. 10, n.º 8, p. e0136540, 2015.
- [10] R. R. Choudhury, H. Yin, and A. Fox, "Scale-driven automatic hint generation for coding style," in *International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, 2016, pp. 122-132.
- [11] E. S. Wiese, M. Yen, A. Chen, L. A. Santos, and A. Fox, "Teaching students to recognize and implement good coding style," in *Proceedings of the Fourth (2017) ACM Conference on Learning@ Scale*, 2017, pp. 41-50.
- [12] R. Singh, "Accessible programming using program synthesis," Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, 2014.
- [13] S. Terman, "GroverCode: code canonicalization and clustering applied to grading," Master of Engineering Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
- [14] P. M. Phothilimthana and S. Sridhara, "High-coverage hint generation for massive courses: Do automated hints help CS1 students?," in *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education*, 2017, pp. 182-187. <https://doi.org/10.1145/3059009.3059058>
- [15] R. Suzuki, G. Soares, E. Glassman, A. Head, L. D'Antoni, and B. Hartmann, "Exploring the design space of automatically synthesized hints for introductory programming assignments," in *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2017, pp. 2951-2958.
- [16] S. Gross, B. Mokbel, B. Hammer, and N. Pinkwart, "How to select an example? a comparison of selection strategies in example-based learning," in *International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, 2014, pp. 340-347.
- [17] R. Rolim et al., "Learning syntactic program transformations from examples," in *ICSE'17: Proceedings of the 39th*

- International Conference on Software Engineering*, 2017, pp. 404-415.
- [18] A. Head et al., "Writing reusable code feedback at scale with mixed-initiative program synthesis," in *Proceedings of the Fourth (2017) ACM Conference on Learning@Scale*, 2017, pp. 89-98.
- [19] B. Paaßen, J. Jensen, and B. Hammer, "Execution Traces as a Powerful Data Representation for Intelligent Tutoring Systems for Programming," in *Proceedings of the 9th Int. Educ. Data Min. Soc.*, 2016, pp. 183-190.
- [20] S. Gulwani, I. Radiček, and F. Zuleger, "Automated clustering and program repair for introductory programming assignments," *ACM SIGPLAN Not.*, vol. 53, n.º 4, pp. 465-480, 2018.
- [21] V. J. Marin, T. Pereira, S. Sridharan, and C. R. Rivero, "Automated personalized feedback in introductory Java programming MOOCs," in *IEEE 33rd International Conference on Data Engineering (ICDE)*, 2017, pp. 1259-1270.
- [22] K. Zimmerman and C. R. Rupakheti, "An automated framework for recommending program elements to novices (n)," in *30th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)*, 2015, pp. 283-288.
- [23] R. Chaturvedi, "Task-based Example Miner for Intelligent Tutoring Systems," Ph. D. Thesis, University of Windsor, 2016.
- [24] P. Freeman, I. Watson, and P. Denny, "Inferring student coding goals using abstract syntax trees," in *International Conference on Case-Based Reasoning*, 2016, pp. 139-153.
- [25] M. T. Irfan and V. N. Gudivada, "Cognitive Computing Applications in Education and Learning," *Handbook of Statistics*, vol. 35, pp. 283-300, 2016.
- [26] T. W. Price et al., "A Comparison of the Quality of Data-Driven Programming Hint Generation Algorithms," *Int. J. Artif. Intell. Educ.*, vol. 29, n.º 3, pp. 368-395, 2019.
- [27] D. Fossati, B. Di Eugenio, S. Ohlsson, C. Brown, and L. Chen, "Data driven automatic feedback generation in the iList intelligent tutoring system," *Technol. Instr. Cogn. Learn.*, vol. 10, n.º 1, pp. 5-26, 2015.
- [28] W. Jin, T. Barnes, J. Stamper, M. J. Eagle, M. W. Johnson, and L. Lehmann, "Program representation for automatic hint generation for a data-driven novice programming tutor," in *International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, 2012, pp. 304-309.
- [29] T. W. Price, Y. Dong, and D. Lipovac, "iSnap: towards intelligent tutoring in novice programming environments," in *Proceedings of the 2017 ACM SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, 2017, pp. 483-488.
- [30] T. W. Price, Y. Dong, and T. Barnes, "Generating Data-Driven Hints for Open-Ended Programming," *Int. Educ. Data Min. Soc.*, 2016.
- [31] T. W. Price et al., "ProgSnap2: A Flexible Format for Programming Process Data," *Companion Proc. Int. Conf. Learn. Anal. Knowl. (LAK 2019)*, pp. 1-7, 2019.
- [32] T. W. Price, N. C. C. Brown, C. Piech, and K. Rivers, "Sharing and using programming log data," in *Proceedings of the 2017 ACM SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, 2017, p. 729.
- [33] A. Hicks, B. Peddycord, and T. Barnes, "Building games to learn from their players: Generating hints in a serious game," in *International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, 2014, pp. 312-317.

- [34] T. Lazar and I. Bratko, "Data-driven program synthesis for hint generation in programming tutors," in *International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, 2014, pp. 306-311.
- [35] B. Paassen, B. Mokbel, and B. Hammer, "Adaptive structure metrics for automated feedback provision in intelligent tutoring systems," *Neurocomputing*, vol. 192, pp. 3-13, 2016.
- [36] M. Andrzejewska and A. Skawińska, "Examining students' cognitive effort during program comprehension – An eye tracking approach", *Artificial Intelligence in Education, AIED 2020*, Springer International Publishing, pp. 25-30, 2020.
- [37] V. D. Gil Vera, "Análisis del aprendizaje: una revisión sistemática de literatura", *Cuad. Activa*, vol. 10, n.º 1, pp. 15-26, 2018.

Revisión sistemática de literatura: Técnicas de aprendizaje automático (machine learning)

Anderson Damián Jiménez Alfaro¹ José Vicente Díaz Ospina²

Recibido: 00/00/0000. Aprobado: 00/00/0000.

Resumen. En la actualidad, existe una gran diversidad de modelos que permiten realizar predicciones, y para ello se cuenta con técnicas de Aprendizaje Automático (*Machine learning*) que pueden ayudar a las organizaciones a potenciar sus ventas a través de estos modelos predictivos. En este artículo se efectúa una búsqueda de literatura científica especializada que brinde claridad sobre cuáles son las técnicas más usadas y bajo qué criterios son efectivas. De acuerdo con las necesidades de la investigación, se han filtrado y seleccionado los artículos más relevantes para dilucidar cómo ejecutar un proyecto de machine learning para el pronóstico de ventas. A partir de la revisión realizada se puede afirmar que las diferentes técnicas de machine learning que se encuentran en la literatura son evoluciones de diferentes técnicas conocidas, lo cual es un componente importante para mantener la competitividad empresarial, y bien empleadas podrían convertirse en herramientas potenciadoras de las ventas en las organizaciones.

Palabras claves: *Machine learning*, pronóstico, inteligencia de negocios, márketing, *business management*.

Abstract. Currently, there are a great diversity of models that allow making predictions, and for this there are machine learning techniques that can help organizations to boost their sales through these predictive models. In this article a specialized search of scientific literature is carried out that provides clarity on which are the most used techniques and under what criteria are they effective. According to the research needs, the most relevant articles have been filtered and selected to elucidate how to execute a machine learning project for sales forecasting. From the review carried out, it can be affirmed that the different machine learning techniques found in the literature are evolutions of different known techniques, which is an important component to maintain business competitiveness, and if they are well used could become sales-enhancing tools in companies organizations.

Keywords: Machine learning, forecasting, business intelligence, marketing, business management.

1 Anderson Jiménez. Magíster en Ingeniería Industrial. Universidad Católica Luis Amigó. Medellín, Colombia. Correo electrónico: anderson.jimenezas@amigo.edu.co ORCID: 0000-0001-6601-7911

2 José Vicente Díaz Ospina. Ingeniero Financiero y de Negocios. Universidad Católica Luis Amigó. Medellín, Colombia. Correo electrónico: Jose.diazos@amigo.edu.co ORCID: 0000-0003-0882-5595

Introducción

En la actualidad, se puede encontrar en la literatura un sinnúmero de textos sobre las diferentes técnicas de Aprendizaje Automático (*Machine Learning*), que pueden ser utilizadas para realizar pronósticos en las ventas, lo que en muchas ocasiones genera confusión a la hora de determinar qué técnica es la más apropiada bajo ciertas condiciones o tipos de variables.

El objetivo de este estudio es hacer una búsqueda sistemática de información que permita resolver las preguntas y que brinde claridad sobre el problema de investigación: las técnicas de aprendizaje automático para realizar pronósticos en ventas. La búsqueda de información se hizo en diferentes fuentes de bases especializadas, y de acuerdo con las necesidades de la investigación se filtraron y seleccionaron los artículos más relevantes que ayudaran a determinar dicha claridad.

Las diferentes técnicas de aprendizaje automático que se encuentran en la literatura son la evolución de diferentes técnicas conocidas, lo cual es un componente importante para mantener la competitividad empresarial y que, bien empleadas, podrían convertirse en herramientas potenciadoras de las ventas en las organizaciones.

Marco teórico

Aprendizaje automático (*Machine learning*): el aprendizaje automático, comúnmente abreviado como ML, es un tipo de inteligencia artificial (IA) que “aprende” o se adapta con el tiempo. En lugar de seguir reglas estáticas codificadas en un programa, esta tecnología identifica patrones de entrada y contiene algoritmos que evolucionan con el tiempo [1].

Pronóstico: es la estimación sobre lo que se espera que pueda suceder respecto a una variable con base en un análisis numérico [2].

Inteligencia de negocio: La inteligencia de negocios (BI, por sus siglas en inglés) combina análisis de negocios, minería de datos, visualización de datos, herramientas e infraestructura de datos, así como las prácticas recomendadas para ayudar a las organizaciones a tomar decisiones más basadas en los datos [3].

Márquetin: es el conjunto de actividades y procesos destinados a crear y comunicar valor de marca, identificando y satisfaciendo las necesidades y deseos de los consumidores.

Business management (Gestión empresarial): gestiona la coordinación y organización de las actividades empresariales. Por lo general, esto incluye la producción de materiales, dinero y máquinas, e implica tanto la innovación como el márquetin [1].

Antecedentes

A continuación, se presenta una revisión de los artículos publicados entre los años 2017 a 2021 afines con el uso de métodos de aprendizaje automático para hacer predicciones.

Aruna et al. [1] realizaron una investigación sobre el uso de técnicas de aprendizaje automático a través de aprendizaje no supervisado con un modelo de regresión de bosque aleatorio, para predecir las ventas de medicamentos falsificados. Los resultados del estudio se utilizan para poder contrarrestar esta problemática identificando qué referencias proyectan ventas fraudulentas, el autor aporta algunas referencias que se constituyen en bases para la realización de proyectos de aprendizaje automático que buscan llevar a cabo un pronóstico de ventas.

De acuerdo con los autores, es importante evaluar diferentes modelos de aprendizaje automático, y de los resultados se debe elegir el que mejor se ajuste para la solución del problema, en este caso el algoritmo de regresión de bosque aleatorio.

Los autores concluyen que, con la ayuda de técnicas de aprendizaje automático, es posible predecir las ventas de medicamentos falsificados y, por lo tanto, contrarrestar estas actividades ilegales e inseguras en los países en desarrollo, porque se han convertido en una gran amenaza para las industrias farmacéuticas. El aprendizaje automático es el futuro y la toma de decisiones es más simple, ya que el conocimiento de la máquina es robusto y se puede confiar en los resultados dados por ella con base en el conocimiento previamente adquirido mediante el análisis de los datos.

Mosquera et al. [2] presentan los resultados de una investigación cuyos objetivos fueron:

- Predecir el nivel de riesgo psicosocial en docentes de colegios públicos colombianos utilizando técnicas de inteligencia artificial.
- Definir qué método de clasificación se ajustaba mejor al problema planteado.

En el estudio se tomó una muestra de 5 340 registros epidemiológicos, correspondientes a evaluaciones psicosociales de los docentes. En el tratamiento de los datos se realizaron varias pruebas estadísticas: un análisis de componentes principales con la finalidad de reducir la dimensionalidad de los conjuntos de datos sin perder mucha información de la base y un análisis de varianza con el fin de establecer si existen diferencias significativas en los resultados.

También se realizó un estudio de algoritmos evolutivos, los cuales son técnicas de optimización metaheurística inspiradas en la evolución biológica. Se mantiene una población de soluciones candidatas en cada generación, y cada solución candidata se codifica en un espacio apropiado para aplicar operadores como selección, reproducción y mutación. Se define una función de *fitness* para medir la calidad de los individuos [2].

Luego de la preparación de datos, los autores evaluaron tres algoritmos de aprendizaje automático con los que buscaron llevar a cabo su predicción: Redes neuronales artificiales, *Naive Bayes* y árboles de decisión, con el fin de obtener los resultados de precisión y tasa de error de cada uno. En este caso, los resultados mostraron que el porcentaje de clasificación y tasa de error del algoritmo de redes neuronales artificiales se ajusta más al objetivo del estudio.

El orden de ejecución de esta investigación aporta bases fundamentales para el desarrollo de proyectos de aprendizaje automático que pretendan predecir alguna variable con datos establecidos. Una vez más se identifica la importancia de validar diferentes algoritmos con el fin de evaluar cuál se ajusta más a la necesidad planteada por el investigador, es claro que con datos bien preparados las técnicas de aprendizaje automático son un aliado importante para la toma de decisiones de acuerdo con las predicciones.

Por su parte, Aggarwal et al. [3] evalúan en su investigación seis algoritmos de aprendizaje automático con el fin de identificar qué modelo es más apropiado para predecir la clasificación de estudiantes en función de su rendimiento.

Según los autores, se pueden utilizar varios algoritmos de clasificación para la predicción: *Naive Bayes*, Regresión logística, Máquina de vectores de soporte, Perceptrón multicapa, Árbol de decisión y bosque aleatorio. La evaluación se hace de acuerdo con el conjunto de datos recopilados después de su preprocesamiento. Los autores concluyen que el Perceptrón multicapa y el Bosque aleatorio demuestran ser los clasificadores más apropiados para predecir el desempeño del estudiante.

Lopes et al. [4] plantean en su investigación el desarrollo de un proyecto de aprendizaje automático, usando la metodología CRISP-DM que consta de los siguientes pasos:

- Comprensión de los datos
- Preparación de datos
- Modelado (diferentes modelos)
- Entrenamiento de datos
- Validación de los modelos
- Evaluación de modelos

Los autores señalan que, para cada conjunto de datos obtenido, se construyeron cuatro modelos predictivos utilizando la plataforma H2O integrada en R, se utilizaron los algoritmos de modelos lineales generalizados, Método de refuerzo de gradiente, bosque aleatorio y *deep learning*. Para realizar la predicción, se eligieron los tres primeros, ya que presentaron menos errores en la evaluación [4].

Los autores concluyen que los modelos de aprendizaje automático son herramientas que potencian los procesos bancarios, asistiendo eficazmente a sus clientes con cada producto o servicio.

Henrique et al. [5] proponen en su investigación que la predicción del precio de las acciones es fundamental para la formación de estrategias de inversión y el desarrollo de modelos de gestión del riesgo. Los autores utilizan la siguiente

metodología para el desarrollo de su modelo de aprendizaje automático:

- Extracción de datos
- Preparación de datos
- Modelado por vectores de soporte
- Entrenamiento de datos.
- Variación de entrenamiento de datos
- Validación de los modelos.
- Análisis de resultados

Los autores desarrollan métodos computacionalmente intensivos, utilizando precios pasados para facilitar una mejor gestión del riesgo de mercado para inversores y especuladores. Concluyen que desarrollar modelos de precios predictivos para el mercado de valores es un desafío, pero es una tarea importante a la hora de construir estrategias de transacciones rentables en los mercados financieros.

Justificación

En la actualidad existe una gran diversidad de modelos que permiten realizar algún tipo de pronóstico, por lo que es necesario efectuar una búsqueda de literatura científica especializada que brinde claridad sobre cuáles son las técnicas más usadas y bajo qué criterios son efectivas; las ventas son un tipo de variable-respuesta que se ha estudiado con el fin de determinar el comportamiento del mercado y así ajustar los recursos necesarios para cumplir con la demanda. Por esta razón, el conocimiento de las técnicas de aprendizaje automático para predecir debe ser amplio, con el fin de convertirlas en una herramienta potencial para la organización.

Metodología

Formulación de las preguntas de investigación

- a. ¿Qué técnicas de aprendizaje automático existen en la actualidad y cuáles son sus características?
- b. ¿Cómo se han aplicado las técnicas de aprendizaje automático para hacer pronóstico?
- c. ¿Qué otras técnicas se han aplicado en la predicción de bienes tangibles o intangibles?

Descripción del protocolo de investigación

- d. Empleando la ayuda de Tesouro de la Unesco, se buscan las palabras claves y relevantes que permitan llevar a cabo una revisión de literatura más próxima a la investigación.
- e. Se ingresa a Scopus para hacer una búsqueda de los autores y revistas especializados en el tema propuesto.
- f. El filtrado se realiza de acuerdo con las necesidades de la investigación:
 - Correspondan al periodo de los últimos 5 años
 - Artículos finales
 - Metodología clara
- g. Selección de los artículos con aportes más relevantes a la investigación.
- g. Discusión de los artículos.
- i. Conclusiones.

Proceso de búsqueda de documentos

- j. Tormenta de ideas
 - Pronósticos de venta basados en técnicas de IA.
 - Modelos de toma de decisiones basados en Inteligencia de negocios.
 - Comparación de los diferentes modelos de tomas de decisiones aplicados al sector real.
 - Diseño de una visualización de datos para la toma de decisiones con base en inteligencia de negocios: Caso de estudio.
- k. Palabras claves:
 - Machine learning
 - Predicción
 - Ventas
 - Inteligencia de negocios
- l. Búsqueda de las palabras claves en las plataformas especializadas de investigación:
 - Codificación
 - Método de aprendizaje
 - Presentación de estadísticas
 - Recopilación de datos
 - Visualización de datos
 - Procesamiento de datos
- m. Ecuaciones de búsqueda.
 - (TITLE-ABS-KEY (machine AND learning) ANDTITLE-ABS-KEY (forecast) AND TITLE-ABS-KEY (marketing)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,

- 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))
- TITLE-ABS-KEY ("Machine Learning" AND "Supervised Learning" AND "Unsupervised Learning") AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))
 - TITLE-ABS-KEY ("Machine Learning" AND "Supervised Learning" AND "Unsupervised Learning") AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))
 - TITLE-ABS-KEY ("Machine Learning" AND "Supervised Learning" AND "Unsupervised Learning") AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))
 - TITLE-ABS-KEY ("Machine Learning" AND "Supervised Learning" AND "Unsupervised Learning") AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))
 - TITLE-ABS-KEY ("Machine Learning" AND "Supervised Learning" AND "Unsupervised Learning") AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))
 - TITLE-ABS-KEY ("Machine Learning" AND "Supervised Learning" AND "Unsupervised Learning") AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))
 - TITLE-ABS-KEY ("Machine Learning" AND "Supervised Learning" AND "Unsupervised Learning") AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))
- ,"final")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))
- TITLE-ABS-KEY ("Machine Learning" AND "Supervised Learning" AND "Unsupervised Learning") AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j"))

Proceso de selección de documentos

Si las respuestas a las siguientes preguntas son afirmativas, se establece que el artículo académico es relevante para la investigación:

- n. El título del artículo académico se relaciona con alguna de las temáticas de la investigación.
- o. El abstract del artículo académico se relaciona con alguna de las temáticas de la investigación.
- p. Las conclusiones del artículo académico se relacionan con alguna de las temáticas de la investigación.
- q. Algunos de los subtítulos del artículo se relacionan con alguna de las temáticas de la investigación.
- r. Algunas referencias bibliográficas del artículo se relacionan con alguna de las temáticas de la investigación.

Proceso de evaluación de la calidad

Los criterios de calidad empleados para la selección de documentos fueron:

Tener un número de citas de mínimo 35 artículos.

- s. Metodología de aplicación clara.
- t. Que tenga cohesión.
- u. Estadística y metodología detalladas.
- v. Que no existan errores en la argumentación del autor.

w. Algunos de los argumentos no se relacionan con las posturas o propuestas del autor.

Proceso de extracción de datos

Se realiza la lectura completa de cada uno de los documentos seleccionados y se efectúan las preguntas de investigación planteadas con anterioridad para determinar cuál o cuáles interrogantes son contestados por el texto, después se extrae la información que da respuesta clara y precisa a las preguntas para un posterior análisis.

Resultados Proceso de búsqueda

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de la búsqueda. corregir tabla

Tabla 1. Resultados del proceso de búsqueda.

Número de Ecuación	Número de elementos en la búsqueda
1	23
2	50
3	35
4	20
5	89
6	40

Fuente: elaboración propia (2021)

Discusión

En la actualidad existe una gran cantidad de técnicas de aprendizaje automático, entre las más conocidas encontramos el Perceptrón Multicapa (MLP), una técnica con estructura flexible que permite relacionar variables no lineales; por otro lado, encontramos diferentes tipos de redes neuronales artificiales como los mapas autoorganizados de Kohonen (SOM), el codificador automático (AuNN) o la autoorganizada basada en errores (SOEDNN), entre otras. Estos son sistemas de redes que ajustan sus parámetros de pesos y umbrales con el fin de producir las salidas deseadas a partir de las entradas establecidas, también son sistemas de aprendizaje sin supervisión que facilitan la detección de datos asociados que no tienen un

comportamiento lineal en series temporales, lo que les permite ser de utilidad en la predicción de datos económicos y financieros. También se encuentran los árboles de decisiones (DT), los cuales tienen un enfoque de clasificación no paramétrico y han sido de uso común en el campo de la calificación crediticia, los resultados predictivos de DT se pueden representar como un gráfico acíclico recitado en forma de árbol, por lo que los resultados del modelo pueden ser fácilmente entendidos por los humanos. Los árboles de regresión son capaces de estimar apareamientos de las relaciones entre variables, depende de modelar la relación funcional entre un dependiente variable (objetivo) y una o más variables independientes (predictores), la regresión constituye una poderosa estadística herramienta de predicción y previsión de un valor continuo objetivo, dado un conjunto de predictores. K-means (KNN) se basa en el concepto de centroides y es más utilizado como algoritmo de agrupamiento. El atractivo de K-means es que incluye simplicidad, escalabilidad y versatilidad; todos los métodos estadísticos son codificados de manera que procesan el mismo conjunto de datos para construcción de modelos y validación de conjuntos de prueba [4]-[10].

Resultados y discusión

Para realizar pronósticos y predicciones en diferentes ámbitos se están utilizando diferentes métodos de aprendizaje automático, por ejemplo, el modelo de Bosque aleatorio sirvió para predecir las ventas de medicamentos falsificados con el fin de contrarrestar esta problemática, entregando resultados que sirven para ejecutar acciones contra este comercio [1], este modelo no solo ha sido utilizado para predecir ventas, también se encontraron trabajos dedicados a la predicción de calificaciones de estudiantes basados en su rendimiento, donde la técnica de bosque aleatorio se ajustaba más y mostraba mejores resultados que otros métodos analizados como, Bayes, Regresión aleatoria, Máquina de Vectores de soporte, Árboles de decisión y Perceptrón multicapa, siendo este último un modelo que también sobresale para este tipo de pronósticos [3]. Otros autores han utilizado árboles de decisión para predecir niveles de deserción de empleados en la organización [13] y pronosticar los riesgos psicosociales en los docentes de colegios públicos colombianos [2].

La aplicación de técnicas predictivas de aprendizaje automático en el campo médico ha sido muy importante, trabajos como la predicción de pacientes con enfermedad del corazón a través de una Red Neuronal han demostrado que se puede ser más eficiente con los diagnósticos, procesando adecuadamente los datos de los pacientes a través de este algoritmo con gran cantidad de variables [14], también se han ejecutado métodos de aprendizaje automático para la predicción de artritis reumatoide en edad temprana procesando datos de pacientes a través de K-Means [15], y aunque en la mayoría de modelos del sector médico se utilizan para predecir enfermedades, también podemos encontrar trabajos donde estas técnicas se aplican para identificar las tendencias en salud en las redes sociales, un ejemplo es el modelo desarrollado en [16], donde a través de Naive Bayes procesaron los datos tomados de opiniones y actitudes de los usuarios en redes sociales para predecir estas tendencias y tomar decisiones sobre los servicios que se debían ofrecer.

Los modelos de aprendizaje automático también se han utilizado para predecir el valor de las acciones por minuto en Brasil, donde se tomaron los principales indicadores financieros de esta localidad y dos años de datos bursátiles para lograr esta predicción [5], con excelentes resultados. El trabajo en [4] propone la construcción de clasificadores basados en la aplicación de modelos de aprendizaje automático para predecir futuros incumplimientos de pago y clientes con potencial recuperación crediticia. En [17] se encuentra un ejemplo de aplicación de técnicas supervisadas de aprendizaje automático en el sector agrícola, donde se elaboró un modelo basado en Kernel para predecir el rendimiento de la caña de azúcar en la India.

Todos los modelos mencionados anteriormente tienen una metodología en común la cual se relaciona a continuación:

- y.** Procesamiento o preparación de datos
- z.** Elección de Modelo o Algoritmo ML
- aa.** Aplicación de algoritmos para reducción de la dimensionalidad
- bb.** Entrenamiento y evaluación con las técnicas de aprendizaje elegidas

cc. Análisis de estabilidad

Esto demuestra que los métodos de predicción de aprendizaje automático se han aplicado en diferentes ámbitos y que sus resultados suelen ser buenos cuando se sigue un proceso de implementación adecuado, empezando por la comprensión de los datos y su procesamiento y eligiendo el algoritmo adecuado de acuerdo con el requerimiento, para garantizar un buen entrenamiento de la herramienta y los ajustes necesarios al modelo final [1], [18].

Se sigue evolucionando permanentemente, en esencia, la base de muchos nuevos modelos sigue siendo los aquí mencionados, que se ajustan o reforman para que se adapten a un contexto específico. Entre estos encontramos FAIR que está diseñado para tratar la gran dimensionalidad de las variables explicativas y la confusión inducida por la regularización, al tiempo que incorpora efectos de series temporales heterogéneas y dinámicas. Las previsiones de FAIR pueden descomponerse en lo que se espera sobre la base de patrones históricos, el impacto de la comercialización propia y de categorías cruzadas, y el impacto de las perturbaciones aleatorias en las ventas de base [12], [19]-[26].

Conclusiones

Con base en los artículos consultados y su discusión se concluye lo siguiente:

Existen tres tipos de aprendizaje automático: aprendizaje supervisado, aprendizaje sin supervisión y aprendizaje de refuerzo, de estos se desprenden diversos algoritmos de aprendizaje automático que podemos utilizar de acuerdo con nuestro requerimiento y nivel de ajuste del modelo. Entre los más comunes se destacan: algoritmos de regresión, algoritmos bayesianos, algoritmos de agrupación, algoritmos de árboles de decisión, algoritmos de redes neuronales, algoritmos de reducción de dimensión y algoritmos de aprendizaje profundo.

Las predicciones y pronósticos a través de técnicas de aprendizaje automático se han aplicado en diferentes ámbitos, y han beneficiado sectores como la salud, la educación, las finanzas, la

producción y la agricultura, ya que sus resultados ayudan a tomar decisiones para mejorar de forma continua resultados, ventas, servicio al cliente y percepción de valor.

Las técnicas mantienen una dinámica evolutiva, lo que permite encontrar una gran variedad de técnicas que se pueden aplicar o transformar dependiendo de las variables de entrada y salida, por otra parte, se debe buscar la minimización de las perturbaciones que se pueden generar al interior del modelo.

Trabajo futuro

Se propone llevar a cabo una investigación sobre cómo predecir las ventas por referencia de un negocio cárnico utilizando modelos de aprendizaje automático, mediante implementaciones de pronóstico de la demanda y pedidos sugeridos para la ejecución del proyecto.

Referencias

- [1] R. Aruna Florence, S. Bethu, V. Sowmya, K. Anusha, y B. Sankara Babu, "Importance of supervised learning in prediction analysis", *Period. Eng. Nat. Sci.*, vol. 6, n.º 1, pp. 201-214, 2018.
- [2] R. Mosquera, O. D. Castrillón, y L. Parra, "Predicción de riesgos psicosociales en docentes de colegios públicos colombianos utilizando técnicas de inteligencia artificial", *Inf. Tecnológica*, vol. 29, n.º 4, pp. 267-280, 2018.
- [3] D. Aggarwal, S. Mittal, y V. Bali, "Prediction model for classifying students based on performance using machine learning techniques", *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, n.º 2, Special Issue 7, pp. 496-503, 2019.
- [4] R. G. Lopes, M. Ladeira, y R. N. Carvalho, "Use of machine learning techniques in the prediction of credit recovery", *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst.*, vol. 2, n.º 3, pp. 1432-1442, 2017.
- [5] B. M. Henrique, V. A. Sobreiro, y H. Kimura, "Stock price prediction using support vector regression on daily and up to the minute prices", *J. Financ. Data Sci.*, vol. 4, n.º 3, pp. 183-201, 2018.
- [6] G. I. Ahmad y J. Singla, "Machine learning techniques for sentiment analysis of indian languages", *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, n.º 2, Special Issue 11, pp. 3630-3636, 2019.
- [7] S. Athey y G. W. Imbens, "Machine Learning Methods Economists Should Know About", Stanford Graduate School of Business", *Work. Pap.*, n.º 3776, March, 2019.
- [8] Z. Ge, Z. Song, S. X. Ding, y B. Huang, "Data Mining and Analytics in the Process Industry: The Role of Machine Learning", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20590-20616, 2017.
- [9] Z. Gong, P. Zhong, y W. Hu, "Diversity in Machine Learning", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 64323-64350, 2019.
- [10] O. Simeone, "A Very Brief Introduction to Machine Learning with Applications to Communication Systems", *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 4, n.º 4, pp. 648-664, 2018.
- [11] M. Usama et al., "Unsupervised Machine Learning for Networking: Techniques, Applications and Research Challenges", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 65579-65615, 2019.
- [12] J. Wang, C. Jiang, H. Zhang, Y. Ren, K. C. Chen, y L. Hanzo, "Thirty Years of Machine Learning: The Road to Pareto-Optimal Wireless Networks", *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 22, n.º 3, pp. 1472-1514, 2020.
- [13] J. Vasa y K. Masrani, "Foreseeing employee attritions using diverse data mining strategies", *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, n.º 3, pp. 620-626, 2019.
- [14] O. Terrada, S. Hamida, B. Cherradi, A. Raihani, y O. Bouattane, "Supervised

- machine learning based medical diagnosis support system for prediction of patients with heart disease", *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst.*, vol. 5, n.º 5, pp. 269-277, 2020.
- [15] B. Jayanthi y C. Senthamarai, "Feature selection using K-means genetic clustering to predict rheumatoid arthritis disease", *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, n.º 3, pp. 7020-7023, 2019.
- [16] S. Saini, S. P. Singh, y R. Agarwal, "Augmented machine learning ensemble extension model for social media health trends predictions", *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, n.º 2 Special Issue 7, pp. 482-486, 2019.
- [17] R. Medar y V. S. Rajpurohit, "Supervised machine learning techniques for predicting sugarcane yield", *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, n.º 2, pp. 5662-5668, 2019.
- [18] R. Jafari-Marandi, "Supervised or unsupervised learning? Investigating the role of pattern recognition assumptions in the success of binary predictive prescriptions", *Neurocomputing*, vol. 434, pp. 165-193, 2021.
- [19] W. Bao, N. Lianju, y K. Yue, "Integration of unsupervised and supervised machine learning algorithms for credit risk assessment", *Expert Syst. Appl.*, vol. 128, pp. 301-315, 2019.
- [20] A. Martínez, C. Schmuck, S. Pereverzyev, C. Pirker, y M. Haltmeier, "A machine learning framework for customer purchase prediction in the non-contractual setting", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 281, n.º 3, pp. 588-596, 2020.
- [21] S. Mohanapriya y S. Mohana Saranya, "Sales prediction using machine learning algorithm", *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 29, n.º 3 Special Issue, pp. 1049-1055, 2020.
- [22] D. Raditya, E. P. Nicholas, A. S. Ferarida, y N. Hanafiah, "Predicting Sneaker Resale Prices using Machine Learning", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 179, pp. 533-540, 2021.
- [23] J. Salminen, V. Yoganathan, J. Corporan, B. J. Jansen, y S. G. Jung, "Machine learning approach to auto-tagging online content for content marketing efficiency: A comparative analysis between methods and content type", *J. Bus. Res.*, vol. 101, September 2018, pp. 203-217, 2019.
- [24] Z. Shahbazi, D. Hazra, S. Park, y Y. C. Byun, "Toward improving the prediction accuracy of product recommendation system using extreme gradient boosting and encoding approaches", *Symmetry (Basel)*, vol. 12, n.º 9, 2020.
- [25] A. Sreekant, P. Senthilnathan, G. Gopichand, M. Rajapandy, y N. Kannan, "Necessity of machine learning and data visualization principles in marketing investment management", *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, n.º 6, Special Issue 4, pp. 527-530, 2019.
- [26] T. Van Nguyen, L. Zhou, A. Y. L. Chong, B. Li, y X. Pu, "Predicting customer demand for remanufactured products: A data-mining approach", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 281, n.º 3, pp. 543-558, 2020.